ANNUEL
des Projets de fin d'études

2022

École des Ponts
ParisTech

Annuel des projets de fin d'études

de l'École des Ponts ParisTech

2022

École des Ponts
ParisTech

Sommaire

Table of contents

5 Le mot de la directrice de l'enseignement
A word from the Dean of Studies

Index des diplômés 268
Alumni Index

Index des organismes 270
Index of organizations

Index des thématiques 272

Index of subjects 273

Département de 1re année
First Year Department
6

Langues et cultures
Languages and Cultures
10

Sciences humaines et sociales
Humanities and Social Sciences
12

Service des sports
Sports Department
14

Génie civil et construction
Civil And Structural Engineering
18

Génie industriel
Industrial Engineering
84

Génie mécanique et matériaux
Mechanical Engineering and Materials Science
114

Ingénierie mathématique et informatique
Applied Mathematics and Computer Science
134

Sciences économiques, gestion, finance
Economics, Management, Finance
178

Ville, environnement, transport
City, Environment, Transportation
220

Le mot de la directrice de l'enseignement

A word from the Dean of Studies

Marie Mathieu-Pruvost

Directrice de l'enseignement, École des Ponts ParisTech
Dean of Studies of École des Ponts ParisTech

L'**École** a le plaisir de mettre à votre disposition cet *Annuel* des projets de fin d'études soutenus cette année.

Depuis quelque temps, nous sommes engagés dans une démarche de valorisation des travaux réalisés par nos étudiants, au cours de leur cursus et lors de leur mobilité, en France et à l'international.

Il s'adresse, en premier lieu, aux diplômés d'une même promotion. La conception des pages individuelles, sous forme de fiches recto-verso en français et en anglais, permet à chaque auteur de s'approprier ce support.

Pour l'École et ses départements d'enseignement, c'est aussi un outil qui sert à analyser, apprécier, comparer les sujets, mais aussi les réponses apportées aux entreprises et aux laboratoires de recherche. Au travers de tous les sujets traités par les élèves, cet Annuel favorise une approche réflexive sur les parcours académiques que nous proposons pour les améliorer, les renforcer, les actualiser.

Enfin, à l'occasion de rencontres avec de nouveaux partenaires, c'est un outil de communication permettant d'appréhender la puissance de travail et la pertinence des idées que peuvent proposer les étudiants, afin de susciter de nouvelles collaborations.

Ce document est donc très précieux, il va inspirer les nouveaux élèves et les enseignants. Faites-en bon usage.

*L'**École** des Ponts ParisTech is pleased to present its current* Final Project Yearbook.

For some time now, we have been engaged in a process of promoting the work carried out by our students, during their studies and during their mobility, in France and abroad.

This Yearbook *is primarily addressed to graduates from the same year. The design of the individual pages, in the form of a double-sided card in French and in English, allows each student to make the best use of this document.*

For the School and its departments, it is also a tool that is used to analyze, assess and compare topics proposed by companies and research laboratories, as well as the students' answers. This Yearbook and all the subjects treated by the students allows for a reflexive approach to the academic programs that we offer, in order to improve, reinforce and update them.

Finally, during meetings with new partners, it is a communication tool to understand the power of work and the relevance of the ideas that students can propose, in order to encourage new collaborations.

This document is therefore very valuable and will inspire new students and teachers. Make good use of it.

Département de 1re année

First Year Department

Les enjeux

La première année assure une transition entre la formation antérieure (classes préparatoires ou 1er cycle universitaire) et le cycle master de la formation d'ingénieur. Son objectif est de contribuer à la formation d'ingénieurs de haut niveau, dotés d'une culture scientifique solide, en leur permettant d'acquérir :

- la capacité à mener des raisonnements scientifiques rigoureux ;
- une intelligence du monde et des relations humaines ;
- la capacité à travailler en équipe.

Il s'agit de donner aux élèves les moyens d'un choix raisonné pour entrer de plain-pied dans les formations professionnalisantes des départements du cycle master.

La formation de tronc commun

Le 1er semestre est dédié aux apprentissages fondamentaux dans les disciplines maîtresses de l'École : Mathématiques (Optimisation, Probabilités, Analyse et calcul scientifique), Mécanique des milieux continus – Solides, Introduction à l'économie, Programmation, Sciences humaines et sociales. Les élèves disposent de créneaux de « travail personnel accompagné » et d'activités pédagogiques réalisées en groupes, tutorées par l'équipe enseignante. Les élèves suivent un séminaire Communication de quatre jours répartis au cours du 1er semestre.

Les cours électifs et les projets

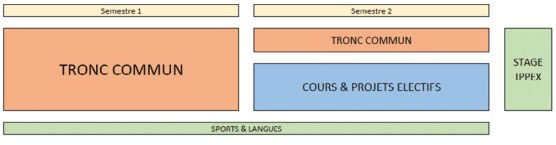
Le 2e semestre propose deux enseignements de tronc commun : Physique statistique, Mécanique des milieux continus/fluides, et des cours d'approfondissement électifs : Algorithme et structures des données, Physico-chimie des états de la matière, Équations aux dérivées partielles et éléments finis, Décision dans l'incertain, Développement durable – Ingénieur dans un monde complexe et incertain, et plusieurs cours de Sciences humaines et sociales.

Ce semestre marque aussi le début du travail en mode projet en collaboration avec les départements du cycle master et les laboratoires de recherche de l'École. Une offre de cours et projets a été conçue de manière à placer les élèves au plus près des situations réelles dans une diversité de champs disciplinaires de l'ingénieur. Les élèves choisissent 4 cours et découvrent des domaines professionnels à travers les projets encadrés par des enseignants et des chercheurs de l'École, dans une offre structurée autour de cinq thématiques : Énergie, Environnement & Sciences du vivant, Matériaux & Structures, Numérique & Systèmes complexes, Ville durable.

Les élèves participent pendant une semaine aux Ateliers Design organisés avec l'École d'architecture de la ville & des territoires de Marne-la-Vallée, où des équipes associant ingénieurs, architectes et designers conçoivent et testent des structures grandeur nature, innovantes et performantes, à partir d'un cahier des charges. Ils ont ainsi l'occasion de réfléchir sur la relation entre fonction et forme d'un objet, de partager leurs compétences, d'agir ensemble en tant que futurs ingénieurs, architectes et designers et de s'initier à la formation d'ingénieur-architecte, au sein de ce processus pédagogique co-construit.

Une mobilité académique Erasmus est proposée aux élèves au 2e semestre dans onze établissements européens partenaires : Imperial College London, École polytechnique fédérale de Zürich, University College de Dublin, l'université technique de Münich, université de Aachen, Politecnico di Milano, Politecnico de Torino, Universita di Roma Tor Vergata, l'université polytechnique de Madrid, l'université polytechnique de Barcelone, l'université technique de Prague.

En fin de 2e semestre, le stage d'immersion tutoré permet d'occuper un poste d'exécutant en entreprise pour une immersion dans le monde du travail, en France ou à l'étranger.

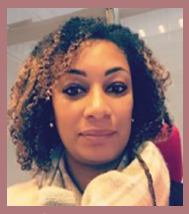


Structure des enseignements du département de 1re année.

François Chevoir
Président
Department Head

Pierre-Jean Cottalorda
Responsable académique
Academic Head

Véronique Coucurou-Ostrowski
Inspectrice des études
Academic Advisor



Catherine Noor
Assistante polyvalente
Department Assistant

Challenges

The first year ensures a transition between students' previous studies (preparatory classes or Bachelor's degree) and the engineering Master's degree. Its objective is to contribute to the education of high-level engineers with a solid scientific culture by enabling them to acquire:

- *the ability to conduct rigorous scientific reasoning;*
- *an intelligence of the world and human relations;*
- *the ability to work in a team.*

All these acquisitions contribute towards enabling the students to choose one of the specialization programs offered by the departments of the Master's degree.

Common core curriculum

The first semester is devoted to fundamentals in the main disciplines for the general engineering program: Mathematics (Optimization, Probability, Analysis, and Scientific Computing), Solid-state Mechanics – Solids, Introduction to Economics, Programming, Humanities and Social Sciences. Guided self-study periods and educational activities carried out in groups, tutored by the teaching team, are also offered to students. The first semester further includes a four-day Communication seminar.

Elective courses and projects

The second semester offers two core courses, namely Quantum and Statistical Physics and Mechanics of Continuous Media/Fluid Mechanics, as well as advanced elective courses: Algorithm and Data Structures, Physico-chemical aspects of states of matter, Partial Differential Equations and finite elements, Decision making in an uncertain environment, Sustainable development: the engineer in a complex and uncertain world, and several courses in the Humanities and Social Sciences.

This semester also marks the beginning of project mode work in collaboration with the Master's departments and the School's research laboratories. A range of courses and projects designed to place students in the real world in a variety of engineering disciplines are on offer. Students choose four courses to discover professional fields through projects supervised by the School's teachers and researchers. The offerings are structured around five themes: Energy, Environment & Biodiversity, Materials & Structures, Digital & Complex Systems, the Sustainable City.

Students participate in week-long Design Workshops co-organized with the École d'architecture de la ville et des territoires at Marne-la-Vallée, where teams combining engineers, architects, and designers design and test life-size, innovative, and efficient structures according to specifications. This co-constructed educational process enables students to reflect on the relationship between the function and form of an object; to share their skills; to collaborate as future engineers, architects, and designers; and to learn about the engineer-architect program.

Academic mobility (Erasmus) is offered to students in the second semester at eleven European partner institutions: Imperial College London, Federal Institute of Technology Zürich, University College Dublin, Technical University of Munich, University of Aachen, Politecnico di Milano, Politecnico de Torino, Universita di Roma Tor Vergata, Polytechnic University of Madrid, Polytechnic University of Barcelona, Technical University of Prague.

At the end of the second semester, the tutored first year professional internship immerses students directly in the working world, either in France or abroad.

Leçon inaugurale – Marc Fontecave, 2021
© École des Ponts ParisTech.

Laboratoires partenaires et chaires

Research partnerships and chairs

Laboratoires • Laboratories

CEREA

Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique. Thématiques : qualité de l'air, dispersion et transports de polluants, modélisation atmosphérique à l'échelle urbaine et régionale, assimilation de données.
Atmospheric Environment Education and Research Center. Themes: air quality, pollution dispersal and transportation, atmospheric modeling on an urban and regional scale, data assimilation.

CERMICS

Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques et Calcul Scientifique. Thématiques : mathématiques appliquées, calcul scientifique, modélisation, optimisation.
Research Center in Mathematics and Scientific Computing. Themes: applied mathematics, scientific computing, modeling, optimization.

CIRED

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement. Thématiques : économie du développement et de l'environnement, questions énergie / déchets / transports / eau / alimentation, enjeux d'environnement global, principe de précaution, modélisation.
International Environment and Development Research Center. Themes: development and environmental economics, energy/waste/transportation/water/food issues, global environmental challenges, precautionary principle, modeling.

HM&CO

Hydrologie Météorologie et Complexité. Thématiques : observation et analyse multi-échelle, modélisation par approche système, gestion de l'eau en tant que risque et ressource, quantité et qualité, hydrologie pour une ville résiliente.
Hydrology, Meteorology, and Complexity. Themes: multiscale observation and analysis, system based modeling, management of water as risk and resource, quantity and quality, hydrology for a resilient city.

LATTS

Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés. Thématiques : sciences sociales, aménagement, histoire, dialogue entre sciences sociales et technique et ingénierie, dans les entreprises comme dans les administrations. Deux grands domaines abordés : organisations productives et organisations territoriales.
Technologies, Territories, and Societies Laboratory. Themes: social sciences, spatial planning, history, dialogue between social sciences and technology and engineering in both private sector companies and the public sector. Two major domains tackled: productive organizations and territorial organizations.

LEESU

Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes urbains. Thématiques : milieu urbain et son environnement, analyse des territoires urbains et périurbains au travers de leur fonctionnement sociotechnique et environnemental en liaison avec les territoires ruraux avec lesquels ils sont en interaction.
Water, Environment, and Urban Systems Laboratory.

LHSV

Laboratoire d'hydraulique Saint-Venant. Thématiques : mécanique des fluides appliquée à l'hydraulique et l'environnement (domaines fluvial, côtier et portuaire).
Saint-Venant Hydraulics Laboratory. Themes: fluid mechanics applied to hydraulics and the environment (rivers, coasts, and harbors).

LIGM

Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge. Thématiques : algorithmes et architectures pour l'analyse et la synthèse d'images ; combinatoire algébrique et calcul symbolique ; logiciels, réseaux et temps réel ; modèles et algorithmes ; signal et communication.
Gaspard Monge Computer Science Laboratory. Themes: algorithms and architectures for image analysis and synthesis; algebraic combinatorics and symbolic computation; software, networks, and real time; models and algorithms; signal and communication.

LMD

Laboratoire de Météorologie Dynamique. Thématiques : dynamique de l'atmosphère, étude du climat et de ses fluctuations interannuelles, échelles continentale et globale.
Dynamic Meteorology Laboratory. Themes: atmospheric dynamics, study of climate and its interannual fluctuations, continental and global scales.

LVMT

Laboratoire Ville Mobilité Transport. Thématiques : analyse et la modélisation des interactions entre transports et aménagement de l'espace.
City, Mobility, Transportation Laboratory. Themes: analysis and modeling of interactions between transportation and spatial planning.

Laboratoire Navier

Thématiques : recherches de base sur la mécanique et la physique des matériaux et des structures et leurs applications à la géotechnique, au génie civil, à la géophysique et à l'exploitation pétrolière.
Themes: basic research on the mechanics and physics of materials and structures, and their applications in geotechnics, civil engineering, geophysics, and the oil industry.

PJSE

Paris-Jourdan Sciences économiques. Thématiques : laboratoire de recherche généraliste en économie, avec couverture large de la discipline. Excellence mondialement reconnue plus spécifiquement en économie théorique, en économie publique et en économie du marché du travail.
Paris-Jourdan Economics Laboratory, Paris School of Economics. Themes: general economics research laboratory with broad coverage of the discipline. A worldwide reputation for excellence, more specifically in theoretical economics, public economics, and labor market economics.

Le département en photos • The department in pictures

Leçon inaugurale de la première année avec Marc Fontecave, 2021, « La transition énergétique aujourd'hui et demain » © École des Ponts ParisTech.

Prises de vues École, Sélection de photos 2017
© École des Ponts ParisTech.

Les ateliers design 2016
© David Delaporte/École des Ponts ParisTech.

Langues et cultures

Languages and Cultures

Forte de ses nombreux accords internationaux, l'École est un campus international et multiculturel fréquenté par 25 % d'étudiants internationaux. Une dizaine de langues étrangères y sont enseignées : l'anglais, le français langue étrangère (FLE), l'espagnol, l'italien, l'allemand, le chinois, l'arabe, le portugais, le russe et le japonais. La cinquantaine d'enseignants du département représente une vingtaine de nationalités. Les élèves étudient deux langues, dont l'anglais, obligatoire pour tous les élèves, et le FLE pour tous les élèves internationaux. 13 % de la durée totale des études est ainsi dédiée aux langues et cultures étrangères.

Le défi assumé de la diversité

Le DLC met en valeur l'hétérogénéité qui caractérise les élèves ingénieurs. En effet, dans une classe de langue, on retrouve des apprenants des départements scientifiques, issus de différentes aires géographiques (régionales, nationales ou internationales), qui mettent en œuvre diverses pratiques langagières englobant des enjeux de médiation linguistique et interculturelle.

Les élèves travaillent donc par projets transdisciplinaires, en équipes multiculturelles. Tous ces éléments favorisent l'émergence de compétences transversales (« heart skills ») pour communiquer et interagir dans une ou deux langues étrangères en contextes national ou international et dans des situations formelles ou informelles. Cela implique de :

- maîtriser des savoir-faire linguistiques, professionnels et de médiation ;
- développer des savoir-être de l'ingénieur et du *manager* citoyen et responsable ;
- s'ouvrir pour s'adapter dans un monde interculturel, plurilingue et transdisciplinaire ;
- élargir sa culture générale et sa culture générale scientifique ;
- s'adapter à un contexte de communication pour présenter un sujet ou un travail scientifique et technique.

Plurilinguisme et interculturalité

Les quelques illustrations suivantes de dispositifs plurilingues et interculturels reflètent une pédagogie active qui vise avant tout à développer une réelle autonomie des élèves dans leurs pratiques langagières :

le Tandem est un module où deux étudiants définissent ensemble leur projet d'apprentissage en amont et s'apprennent mutuellement leur langue maternelle et leur culture. La gestion d'un projet commun pousse chaque binôme à réfléchir sur son propre processus d'apprentissage ;

échanges à distance : plusieurs dispositifs de type « échange à distance » ont été mis en place à l'École. Par exemple, « Speaking Near and Far », où les élèves de l'École et ceux d'une université américaine forment une équipe en télécollaboration en utilisant leur langue respective ;

- pratiques artistiques et créatives : par exemple, « Écrire et raconter des récits pour une rencontre interculturelle trilingue », où les apprenants développent leur créativité, individuelle et collective, en écrivant des histoires en espagnol, allemand et français ;
- « Drama Club Journeys » : à travers des voyages de découverte de soi-même et des autres par l'expérience des improvisations et des jeux théâtraux, les apprenants coécrivent une pièce sur un thème, en lien avec leur future vie professionnelle. Ils jouent ensuite la pièce devant un public.

À l'image de ces dispositifs, les cours proposés au DLC ont pour but de créer une culture plurilingue et interculturelle. Au contact d'autres cultures, on redécouvre mieux la sienne. C'est grâce à cette reconnaissance réciproque que nous réussissons à décloisonner nos langues et cultures.

Cours de langue à l'École
© Yann Piriou/École des ponts ParisTech, 2017.

Jörg Eschenauer

Président | Responsable de la section d'allemand
Department Head | German Section Coordinator

Mariluz Di Tillio-Lacruz

Adjointe | Responsable de la section d'espagnol/ enseignante
Assistant Department Head | Spanish Section Coordinator and teacher

Amokrane Kaddour

Adjoint | Enseignant de FLE
Assistant Department Head | FFL teacher

Stacey Benoît

Responsable de la section d'anglais et enseignante
English Section Coordinator and teacher

Isabelle Salengros Iguenane

Responsable de la section de FLE et enseignante
FFL Section Coordinator and teacher

Diarietou Coulibaly

Assistante polyvalente
Department Assistant

With its many international partnerships, the School is an international and multicultural campus hosting an international student population of 25%. A dozen languages are taught: English, French as a foreign language (FFL), Spanish, Italian, German, Chinese, Arabic, Portuguese, Russian, and Japanese. The fifty teachers in the department represent more than twenty different nationalities. Students are required to study two foreign languages, including English, which is compulsory for all students, and FFL for all international students. 13% of their total studies are thus devoted to foreign languages and cultures.

The challenge of diversity, fully accepted

The DLC highlights the heterogeneity that characterizes engineering students. Indeed, in any given language class, there are learners from different scientific departments and geographical areas (regional, national, and international) who embody various language practices and raise issues of linguistic and intercultural mediation.

Students work on transdisciplinary projects in multicultural teams. This favors the emergence of cross-skills ("heart skills") of communication and interaction in one or two foreign languages in national or international contexts and in formal or informal situations. Students are involved in:

- *mastering linguistic, professional, and mediation skills;*
- *developing the skills of a responsible citizen-engineer and -manager;*
- *adapting to an intercultural, multilingual, and transdisciplinary world;*
- *broadening general knowledge and scientific culture;*
- *developing communication and presentation skills for scientific or technical subjects and projects.*

Plurilingualism and interculturality

The following illustrations of plurilingual and intercultural teaching practices reflect an active pedagogy that aims above all to develop students' effective autonomy in their language practices:

- *Tandem: a module where two students predefine their learning project together and learn each other's language and culture. The management of a joint project encourages each pair to reflect on their learning process;*
- *Distance exchanges: several "distance exchange" schemes have been set up at the School, such as "Speaking Near and Far", where students form a telecollaborative team with students from an American university with both sides using the other's language;*
- *Artistic and creative practices, such as "Writing and telling stories for a trilingual intercultural encounter", where learners develop their creativity, individually and collectively, by writing stories in Spanish, German, and French;*
- *"Drama Club Journeys": through journeys of discovery of oneself and others, as well as the experience of improvisations and theatrical games, learners co-author a play on a theme in connection with their future professional life. They then act the play in front of an audience.*

As illustrated by these teaching practices, courses offered by the DLC are intended to develop a plurilingual and intercultural approach. Through contact with other cultures, we are better able to rediscover our own. Thanks to this mutual recognition, we can bridge the gap between our diverse languages and cultures.

Journées langues et cultures
© École des Ponts ParisTech, 2016.

Sciences humaines et sociales

Humanities and Social Sciences

Enjeux

Le département SHS est un département transversal qui est le support d'une offre d'enseignement en première, deuxième et troisième années. Comme les autres départements, le département SHS prépare les élèves à leur vie professionnelle future. Il ne s'agit pas d'offrir un vernis culturel aux élèves, mais de leur donner des ressources pour une prise de distance critique sur leur future pratique d'ingénieur. Il s'appuie pour cela sur des méthodes et des savoirs rigoureux portés par les différentes disciplines des sciences humaines et sociales. Cette volonté de sérieux et de bien marquer les apports spécifiques (et les limites) des sciences humaines et sociales par rapport aux sciences de l'ingénieur n'interdit pas de faire appel à des pédagogies innovantes (pratique théâtrale, analyse de la pratique, travail d'archive, production de vidéos ou de sites internet, etc.). La curiosité doit rester un moteur de la motivation des élèves.

Des enseignements rassemblés autour de 3 finalités

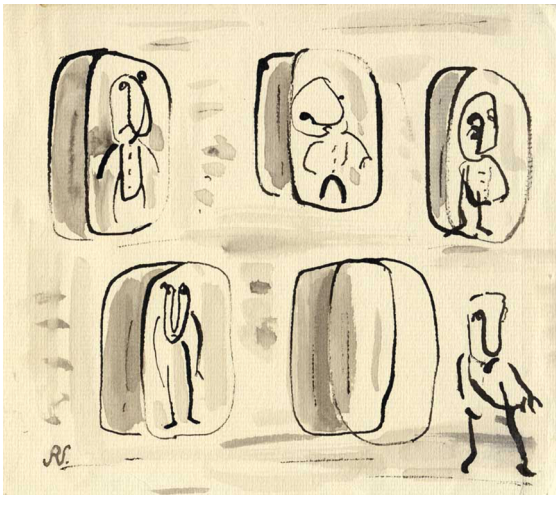
La première est de permettre aux élèves largement marqués par un enseignement scientifique de se confronter à d'autres manières de penser et d'autres formes de rigueur. C'est ainsi que dans les cours de droit, ils sont amenés à construire un raisonnement à partir de la jurisprudence. Ils peuvent aussi découvrir les méthodes et concepts de l'anthropologie ou de la philosophie politique et, de manière générale, une large palette des disciplines de SHS.

La seconde est d'ouvrir les voies de lectures critiques des techniques dont ils seront les porteurs et de leur permettre de replacer l'ingénieur et la technique dans la société : histoire de l'ingénieur et histoire des sciences, histoire des technologies urbaines, cartographie de controverses scientifiques, réflexions sur le mésusage des chiffres.

La troisième, depuis 2016, consiste à préparer les élèves à appréhender le monde du travail comme un monde humain et social en leur donnant accès à diverses sciences du travail (sociologie des organisations, psychologie, ergonomie, approches interculturelles, etc.). La formation dans ce domaine étant indissociable de la pratique, l'offre d'ateliers et de cours est articulée autour des stages, en amont et en aval. Il s'agit d'offrir aux élèves des grilles d'analyse qui leur permettent d'être mieux armés face à des situations potentiellement déstabilisantes et de faire de ces stages la première marche d'apprentissage dans un parcours qui les conduira vers des fonctions d'encadrement.

L'offre d'enseignement

- Première année : un cours de communication, un cours sur l'histoire de l'ingénieur, un exercice « cinéma et travail » d'introduction au monde du travail, en préparation du stage d'insertion professionnelle en position d'exécutant, et un cours optionnel parmi de nombreuses disciplines ;
- deuxième année : un cours de droit, un cours optionnel parmi de nombreuses disciplines et une offre d'accompagnement au stage ;
- troisième année : un exercice de retour d'expérience sur le stage de deuxième année.



Sortir du cadre © Gilles Jeannot.

Gilles Jeannot
Président
Department Head

Lucile Gindre
Inspectrice des études
Academic Advisor

Imane Hamade
Assistante polyvalente
Department Assistant

Challenges

The SHS department is a cross-cutting department that offers courses in all three years of the Engineering Degree Program. Like other departments, the SHS department prepares students for their future professional life. The goal is not to offer a cultural veneer to the students but to give them the resources to develop a critical perspective on their future engineering practice. This task depends on rigorous methods and knowledge inherent to the different disciplines of the human and social sciences as well as the clear identification of the specific contributions (and the limits) of the social sciences and humanities compared to the engineering sciences, and is accompanied by innovative pedagogies such as role playing, analysis of professional practice, archive work, and video/website production. Throughout, curiosity is recognized as the driving force of student motivation.

Courses centered on three goals

The first goal is to enable students immersed in a scientific education to confront other ways of thinking and other forms of intellectual rigor. For example, in law courses, students are educated to reason while relying on jurisprudence. Students also have the possibility of engaging the methods and concepts of anthropology or political philosophy and, more generally, a broad spectrum of humanities and social sciences disciplines.

The second goal is to cultivate an open-mindedness that equips students with a critical approach to the engineering techniques they will implement and allows them to situate the engineer and technology at the heart of society. This goal is approached by studying the history of the engineer and the history of science, the history of urban technologies, the cartography of scientific controversies, and reflections on the misuse of statistics.

The third goal, since 2016, is to prepare students to apprehend the world of work as a human and social world by giving them access to various work sciences (sociology of organizations, psychology, ergonomics, intercultural approaches, etc.). As education in this field is inseparable from practice, workshops and courses are offered both before and after students' internships. The aim is to allow students to develop analytical thinking in order to be better armed to face potentially destabilizing situations and to make their internships the first learning step in a journey that will lead them to exercise executive functions.

Course offerings

- *First year: a course in communication and the history of the engineer, an exercise in "cinema and work" with the aim of introducing students to the world of work and preparing them for work placement, and an elective course (chosen from among several disciplines offered);*
- *Second year: a law course, an elective course (chosen from among several disciplines offered), and internship preparation;*
- *Third year: a feedback exercise on the second year internship.*

Le monde du travail comme espace de coopération
© Laure Criqui.

Service des sports

Sports Department

Le sport fait partie intégrante de la formation des ingénieurs des Ponts

La pratique physique et sportive participe à la formation du cadre de demain, un être capable de communiquer, de participer à la dynamique d'un groupe, d'innover, de s'adapter. L'enseignement dispensé permet de solliciter toutes les ressources de l'étudiant, motrices, cognitives, relationnelles, émotionnelles, informationnelles, etc. Par l'action, l'étudiant est confronté à la résolution de problèmes complexes et à la prise de décision. Il doit se connaître pour s'engager dans une pratique responsable et lucide, dans une démarche d'apprentissage, d'entraînement, et dans un projet d'entretien durable de sa santé, dans une logique de développement personnel. Il doit gérer un groupe, s'investir dans une structure, faire preuve d'innovation et de créativité.

Le service des sports gère cette formation ainsi que l'ensemble des activités sportives de l'École, notamment les nombreux équipements mis à la disposition des étudiants et du personnel de l'École : courts de tennis, terrain de basket/volley, terrain de foot/rugby synthétique, urbanfoot, gymnase avec une salle de danse, de gymnastique sportive et de sports collectifs, salle de musculation, de danse. Ces installations sportives appartiennent à l'École. Pour certaines activités, elles sont louées : aviron, natation, tennis, boxe, tennis de table et escalade.

La responsable du service des sports s'occupe de la gestion des modules de sport qui sont obligatoires pour l'obtention du diplôme de l'École des Ponts ParisTech. Le service des sports aide et accompagne le Bureau des sports (BDS) dans son fonctionnement et s'assure de sa bonne gestion. L'association sportive (AS ENPC) organise le sport de compétition et de loisir à l'École.

Du sport pour tous et tous les jours à l'École !

Aujourd'hui ce sont plus de 450 étudiants qui pratiquent une activité sportive dans le cadre de leur formation à l'École. Ce sont presque autant d'étudiants qui sont licenciés à l'AS ENPC, font un sport en loisir ou en compétition et participent à des week-ends sportifs. Des créneaux horaires sont réservés aux activités sportives car le sport, sanctionné par ECTS, est obligatoire en première et en deuxième années de la formation d'ingénieur. La liste des sports accessibles est définie chaque année par la responsable des sports. Les sports collectifs sont privilégiés afin de développer l'esprit d'équipe et de faciliter l'intégration des nouveaux étudiants en deuxième année. Les modalités d'inscription et de validation sont définies dans le livret d'accueil des étudiants.

Une pratique encadrée et évaluée

Chaque année, les étudiants font un choix mi-septembre parmi 16 activités sportives et seront évalués dans l'activité choisie après avoir réalisé les 20 séances demandées. L'assiduité est essentielle à la validation et à la progression, elle fait donc l'objet d'un suivi rigoureux. La note est attribuée par l'enseignant en fonction de l'inclusion dans le collectif, de l'implication, du travail, des progrès dans les entrainements et de l'engagement dans les compétitions universitaires. L'évaluation se fait sur la base d'un contrôle continu, même si des épreuves ponctuelles sont organisées dans certains sports. Une évaluation formative est réalisée à la fin du premier semestre. En cas d'inaptitude partielle ou totale à la pratique sportive, des activités alternatives sont définies (selon le cas : musculation, natation ou rédaction d'un mémoire sur un thème sportif, ou projet de recherche en sport).

Boxe © Anne Nottelet Tollard.

Anne Nottelet Tollard
Responsable
du service des sports
Department Head

Véronique Ostrowski
Adjointe
à la responsable
des sports
Department Assistant

Sport is an integral part of the education and training of Ponts engineers

Physical activity and sports practice contribute to the education of tomorrow's executives, people who can communicate, participate in group dynamics, innovate, and adapt. The sports program aims to mobilize all the students' resources (motor, cognitive, relational, emotional, informational, etc.). Through action, the students are tasked with the resolution of complex problems and with decision-making. They must know themselves, in order to engage responsibly and lucidly in a learning and training process and in order to develop a sustainable project of health maintenance with the aim of furthering their personal development. They must be capable of managing a group, becoming involved in a team, and demonstrating innovation and creativity.

The program, as well as all of the School's sports activities, in particular the many facilities available to students and School staff including tennis, basketball, and volleyball courts; soccer, synthetic rugby, and urban soccer pitches; and a gymnasium (dance studio, gymnastics and team sports rooms, weight rooms), are managed by the Sports Department. These sports facilities are located on the School campus, while for other activities, such as rowing, swimming, tennis, table tennis, and climbing, additional facilities are contracted.

The Head of the Sports Department is in charge of managing the sports modules which are required for graduation. The Sport Department also helps and accompanies the Student Sport Office (BDS) in its operations and ensures its good management. In addition, the School Sports Association (AS ENPC) organizes competitive and leisure sport activities at the School.

Sport for everyone and every day at the School!

Today, there are more than 400 students who are active in sports as part of their education at the School and are members of the School Sports Association. They engage in sports as a leisure activity or in competition and participate in sports weekends. Time blocks are reserved for sports activities because sport, validated by ECTS, is compulsory in the first and second year of engineering studies. The list of sports offered is established each year by the Department Head. Team sports are given priority in order to develop team spirit and facilitate the inclusion of new students at the beginning of the Master's program. Registration and validation procedures are outlined in the student welcome booklet.

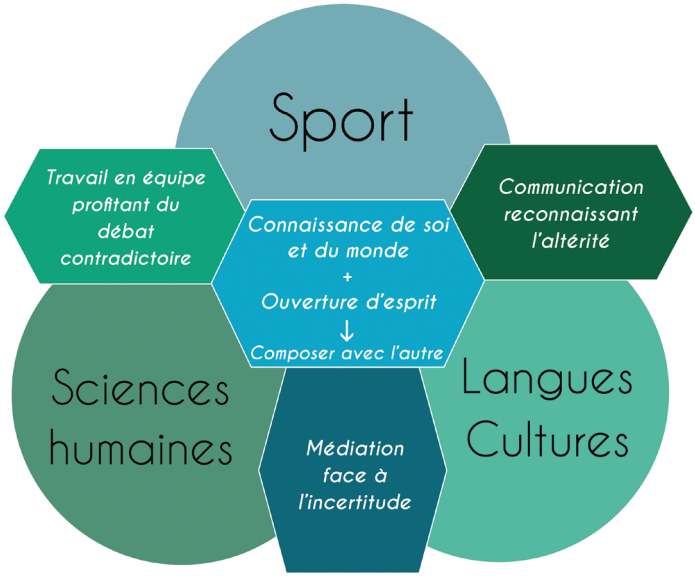
Monitored and evaluated sport activities

Each year, at the beginning of September, students choose one from among 16 sports activities for which they will be evaluated after completing the 20 sessions required. Attendance is essential for validation and progression and is therefore closely monitored and graded by the teacher. Grades are awarded based on team work, involvement, individual work, progress in training, and participation in School competitions. The evaluation is based on continuous assessment, even if periodic evaluations are organized in certain sports. In case of partial or total inability to practice sports, students are directed towards alternative activities (in individual cases, these can include strength training, swimming, writing a report related to sport, or a sport research project).

L'unité de l'équipe pour la réussite © Anne Nottelet Tollard.

Une approche partagée
A shared approach

Des compétences transversales • *"Heart skills"*



"Heart skills" © Jörg Eschenauer, Gilles Jeannot et Anne Nottelet Tollard, 2019.

Travailler en équipe • *Team work*

Langues et cultures

Drama Club, journées Langues et cultures
© École des Ponts ParisTech, 2016.

Sport

Handball, terrain Maison haute
© Anne Nottelet Tollard, 2018.

Sciences humaines et sociales

Extrait de DE GENSSANE, Antoine, 1797. *Pompes portatives pour éteindre les incendies*.
Cote La Source : Ms. 847 © École des Ponts ParisTech.

Génie civil et construction

Civil And Structural Engineering

En 2e année, les élèves en formation d'ingénieur peuvent choisir un cursus proposé par le département Génie civil et construction (GCC). Ce cursus les oriente vers la conception d'ouvrages, la gestion de grands projets, l'organisation de chantiers, ou encore l'innovation et le développement de nouveaux matériaux et techniques constructives.

Le département GCC forme ainsi des ingénieurs concepteurs et constructeurs, ayant une approche globale des projets, un haut niveau scientifique et une forte technicité.

Les enjeux

Villes entières dans certains pays émergents, constructions off-shore, réseaux de transports… On construit aujourd'hui dans le monde comme jamais auparavant. Les concentrations urbaines nécessitent l'invention de solutions pour les bâtiments comme pour les infrastructures (gratte-ciel de très grande hauteur, réseaux métropolitains…).

Les besoins évoluent, engendrant des constructions sans précédent de par leurs fonctions et leurs dimensions (méga stades, aéroports géants, réseaux TGV…).

Mais dans un contexte d'urgence climatique, de dégradation de la biodiversité et d'artificialisation des sols, l'impact environnemental de la construction est tel qu'un renouvellement profond des techniques s'avère nécessaire pour réduire les dépenses énergétiques, faire recirculer la matière…). Les phénomènes d'érosion, de pollution et d'instabilité des sols sont de plus en plus fréquents. Y remédier implique un développement important de la mécanique des sols et des techniques associées.

De nouveaux matériaux (bétons et aciers à très hautes résistances, composites) et de nouvelles méthodes de calcul liées à l'informatique apparaissent, bouleversant la conception des bâtiments et des ouvrages. La numérisation et la robotisation ouvrent de nouvelles perspectives pour une construction efficiente et durable.

Du fait de ces diverses transitions, le rapport entre la société et la technique s'est transfo. Une grande attention au contexte, à l'environnement et aux usagers est désormais exigée, ce qui impose à l'ingénieur de savoir expliquer, négocier, débattre pour aboutir aux solutions techniques les plus appropriées. Ces évolutions fondamentales appellent des ingénieurs concepteurs et constructeurs de haut niveau qui sont amenés à aborder la complexité des systèmes constructifs dans une approche pluridisciplinaire.

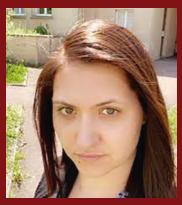
Les métiers

La formation dans le département GCC permet de travailler dans tous les secteurs de la construction (bâtiments, ouvrages d'art, travaux publics, géotechnique, structures, travaux maritimes, ouvrages pour l'énergie…) et ouvre à de très nombreux métiers : maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, bureaux d'études, entreprises de travaux, recherche & développement, méthodes.

Trois filières sont proposées :

- Ingénieur Génie civil, incluant plusieurs parcours ;
- Ingénieur Structures et architecture : deux filières, à l'interface entre architecture et ingénierie mêlent étudiants et enseignements de l'École des Ponts ParisTech et de respectivement, l'ENSAVT Marne-la-Vallée et l'ENSAPM Paris-Malaquais. Elles constituent une préparation au double diplôme ingénieur architecte ;
- Ingénieur Chercheur : trois masters-recherche peuvent être suivis en 3e année : AMMS (Approches multi-échelles des matériaux et des structures), MSROE (Mécanique des sols, des roches et des ouvrages dans leur environnement) et SMCD (Sciences des matériaux pour la construction durable). Ce parcours prépare les élèves à une carrière d'ingénieur-expert ou à la poursuite d'études en doctorat.

Le pont de Térénez dans le Finistère entre Rosnoën et Argol, achèvement 2011. Concepteur : Michel Virlogeux, architecte : Charles Lavigne © Robert Le Roy.



Bernard Vaudeville
Président
Department Head

Arthur Lebée
Adjoint au président
Assistant Department Head

Aphrodite Michali
Directrice académique
Academic Head

Myriam Saadé
Responsable académique
Head of Academic Affairs

Florence Borde
Inspectrice des études
Academic Advisor

Katy Pfinder
Assistante polyvalente
Department Assistant

Maewa Bordes
Assistante polyvalente
Department Assistant

For their second year of engineering studies, students can choose a curriculum offered by the Civil and Structural Engineering Department (GCC) to design structures, manage major projects, organize worksites, innovate and develop new materials and constructive techniques.

The GCC department trains design and construction engineers with a global approach to projects, a high scientific level and a strong technical background.

The issues at stake

Never before has the global built environment expanded at such a pace: whole cities in emerging countries, off-shore structures, transport networks, etc. *are being designed and edified. Urban concentration requires the invention of effective solutions for both buildings and infrastructure, such as very high-rise buildings, metropolitan networks,* etc.

Population needs and priorities are changing, leading to unprecedented constructions in terms of function and size (mega stadiums, giant airports, high-speed train networks, etc.*).*

In the context of climate emergency, biodiversity degradation and soil artificialization, the environmental impact of construction is such that a profound renewal of techniques is necessary to reduce energy consumption and waste generation, recirculate matter etc. *Erosion, pollution and soil instability are more and more frequent and require a major development of soil mechanics and associated techniques. New materials (very high performance concrete and steel, composites) and new computer calculation methods are revolutionizing the design of structures. Digitalization and robotization are opening up new prospects for efficient and sustainable construction.*

Given these transitions, the relationship between society and technology is transformed. Great attention to the context, the environment and users is now needed, which requires the engineer to know how to explain, negotiate and debate in order to come up with the most appropriate technical solutions. These crucial developments call for high-level design and construction engineers challenged to address the complexity of constructive systems in a multidisciplinary approach.

Employment prospects

A qualification from the Civil and Structural Engineering Department enables you to work in all sectors of construction (buildings, engineering structures, public works, geotechnics, structures, maritime works, energy works, etc.*) and opens up a wide range of professions in project management, design offices, construction companies, research & development, methods.*

The three proposed pathways within the program:

- *Civil Engineer, including several career paths;*
- *Structures & Architecture Engineer: two paths, at the interface of architecture and engineering, mingle students and teaching from École des Ponts ParisTech and, respectively ENSAVT Marne-la-Vallée and ENSAPM Paris-Malaquais. It prepares for the double degree in engineering and architecture;*
- *Research Engineer: the courses of three research masters can be taken in the 3rd year: AMMS (Multi-scale approaches to materials and structures), MSROE (Mechanics of soils, rocks and structures in their environment) and SMCD (Materials sciences for sustainable construction). This path is intended for students wishing to pursue a career in engineering expertise or to continue their doctoral studies.*

Semaine d'ouverture du département « Construire le courbe »
© Patrick Sagnes/École des Ponts ParisTech.

Laboratoires et chaires

Laboratories and chairs

Laboratoires • Laboratories

GSA, École d'Architecture de Paris-Malaquais

Laboratoire Géométrie, Structure et Architecture.

Geometry, Structure and Architecture Laboratory.v

LHSV

Laboratoire d'hydraulique Saint-Venant. Thématiques : mécanique des fluides appliquée à l'hydraulique et l'environnement (domaines fluvial, côtier et portuaire).

Saint-Venant Hydraulics Laboratory. Themes: fluid mechanics applied to hydraulics and the environment (rivers, coasts, and harbors).

Laboratoire Navier

Thématiques : recherches de base sur la mécanique et la physique des matériaux et des structures et leurs applications à la géotechnique, au génie civil, à la géophysique et à l'exploitation pétrolière.

Themes: basic research on the mechanics and physics of materials and structures, and their applications to geotechnics, civil engineering, geophysics, and the oil industry.

Les projets de fin d'études
Final year projects

Bâtiment • *Buildings*

ABDELOUAHED BOUMARCHID | Conception et calcul des planchers mixte bois-béton : Outil de calcul et étude de cas
Design and calculation of mixed wood-concrete floors: Calculation tool and case study

CYRIL MORANE | Isolation sismique 3D
3D seismic isolation

Écoconception • *Ecodesign*

JUAN CRUZ AVELLANEDA CUFRÉ | Recherches de conception bas-carbone appliquée aux structures en charpente métallique
Low-carbon design research applied to steel structures

BAPTISTE MENDES | Influence de la structure et de sa forme sur la performance environnementale des quartiers
Influence of structure and its shape on the environmental performance of neighborhoods

LOUIS SUCHIER | Caractérisation de la réponse des voûtes à des sollicitations thermiques exceptionnelles
Characterization of the response of vaults to exceptional thermal stresses

LOUIS WIART | Évaluer et valoriser l'approche RSE d'une agence VRD
Assess and enhance the ESG approach of a public works agency

Géotechnique • *Geotechnics*

ÍÑIGO CANALES GARCÍA | Rétroanalyse des déformations des parois moulées : méthodes de calcul et inclinomètres
Retroanalysis of diaphragm wall deformations: calculation methods, inclinometers

RABEB CHROUD | Contribution à la conception et au dimensionnement géotechnique de gares enterrées
Contribution to the design and geotechnical dimensioning of underground stations

ANAS HAFID | Validation du projet de nouvel Eurocode EN1991-1-8
Validation of the draft of the new Eurocode EN1991-1-8

Matériaux • *Materials*

THI NGA NGUYEN | Résistance au gel/dégel du béton drainant
Freeze/thaw resistance of pervious concrete

MAXIME PIERRE | Conception de matériaux cimentaires architecturés par simulation et apprentissage
Simulation and learning driven design of architected cement-based materials

Méthodes • *Methods*

ANTHONY CHAMAILLE | Fondation flottante en béton armé post-contraint pour éoliennes en mer
Post-stressed reinforced concrete floating foundation for offshore wind turbines

Modélisation et optimisation • *Modelling and optimization*

AGATHE CHEVALLIER | Modélisation aux éléments finis de calculs thermomécaniques sur des réservoirs à gaz naturel liquide (LNG)
Finite element modeling of thermomechanical calculations on Liquid natural gas tanks (LNG)

ODRAN HAQUETTE | Modélisation numérique des actions de vent et optimisation des formes architecturales
Numerical modeling of wind actions and optimization of architectural forms

JOSEPH MANSOUR | Optimisation du calcul des planchers prédalles
Optimization of the calculation of precast floors

JULIE RODET | Étude d'interaction sol-bâtiment sous sollicitation sismique
Study of the effects of soil-structure interaction (ISS) under seismic stress

CHRISTEL SEMAAN | Modélisation paramétrique et optimisation de ponts construits par encorbellements
Modeling and optimization of a balanced cantiliver bridge

LUCIE VINCENT | Études paramétriques pour optimisation des méthodes de dimensionnement des soutènements
Parametric studies for optimization of the dimensioning methods of retaining structures

Ouvrages d'art et infrastructures · *Engineering structures and infrastructures*

FLAVIEN CHAPUIS | Obstruction par bois flottants des évacuateurs de crue des barrages de la Suisse
Blockage of Swiss dam spillways by floating woods

IYES KHALIL | Automatisation des cartes d'identité des BFUP et optimisation des poutres PRAD en BFUP
UHPRFC properties automated analysis and optimization of prestressed UHPRFC girders

THOMAS LUGINBUHL | Renforcement sismique de structures par tissu en fibre de carbone
Seismic reinforcement by carbon fibre-reinforced polymer

ALAIN ANTHONY MARDO | Automatisaton de la vérification mécanique de structure de chaussées pour plusieurs pays
Automation of mechanical verification of pavement structures for several countries

PIERRE MONCHANIN | La technologie des ponts à âmes plissées. État de l'art et étude de conception détaillée
Corrugated steel web bridges. State of the art and detailed design

ROLAND TOURNADE | Étanchéité du barrage de Singrobo-Ahouaty
Waterproofing solutions of Singrobo-Ahouaty dam

ANTOINE WANTZ | Les *network arches*. État de l'art et conception
Network arches. Study of the art and applied design

Structures

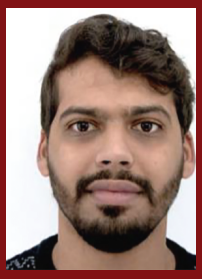
SABINE BOULVARD | Dimensionnement au feu des éléments de structure en béton armé en flexion composée déviée
Fire design of reinforced concrete structural members under deviate bending

ANNE BURKHARD | Comportement au feu des structures
Fire behavior of structures

INÈS CHAMPAGNE | Modélisation aux EF des structures en pierre avec la méthode du « bloc-à-bloc »
Finite element modeling of stone structures with a "stone-by-stone" method

CHLOÉ LEFEU | Enjeux de la conception de toiles tendues déployables de type "Ridge & valley"
Design challenges of deployable tensile roofs of type "Ridge & valley"

PIERRE NAVARO AUBURTIN | Optimisation de la précontrainte de coques
Optimization of the prestress of shell structures



Abdelouahed BOUMARCHID

Élève ingénieur double diplôme
École Hassania des travaux publics (EHTP), Casablanca, Maroc

Promotion 2018

Mission recherche réalisée à :
Setec tpi

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Jordi CORNUDELLA, ingénieur structure

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Robert Le Roy, directeur du Mastère Spécialisé® Génie civil européen,
École des Ponts ParisTech

Conception et calcul des planchers mixte bois-béton : Outil de calcul et étude de cas

Mots-clés : mixte bois-béton, connecteur, méthode γ, outil de calcul

Contexte

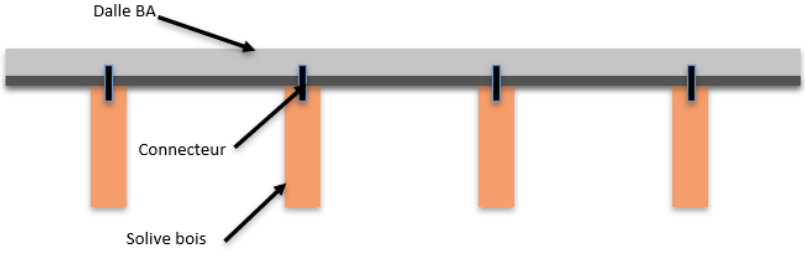
Les structures mixtes bois-béton, développées au début pour des ponts dans les années 1930, regagnent du terrain ces dernières années comme une solution fiable, qui représente des avantages à la fois structurels, économiques et environnementaux. Les planchers mixtes bois-béton se composent d'une dalle en béton armé liée, *via* un connecteur mécanique ou chimique, à des solives en bois en dessous. Cette configuration permet d'utiliser au mieux les propriétés de chaque matériau. Ainsi, on réalise une section capable de reprendre plus de charges en comparaison à un plancher en bois.

Missions et objectifs

À l'issue de ce projet de fin d'études, un outil de dimensionnement sur Excel a été développé, il nous permet de réaliser une étude de cas, en variant les dimensions et les charges, afin de détecter les tendances et de comparer l'efficacité de quelques connecteurs trouvés sur le marché, selon différents paramètres.

Résumé

Le calcul de ces planchers se base sur la méthode γ, présentée dans l'Annexe B de l'Eurocode 5, et recommandée par les avis techniques des fabricants des connecteurs. On se base aussi dans ce rapport sur un nouveau projet de l'Eurocode 5, qui prend en compte des structures mixtes bois-béton et présente les règles communes de conception et de calcul de ce type de structures.



Exemple d'une section mixte bois-béton © Abdelouahed Boumarchid, 2021

Design and calculation of mixed wood-concrete floors: Calculation tool and case study

Keywords: mixed wood-concrete, connector, γ method, calculation tool

Context

Wood-concrete composite structures, first developed for bridges in the 1930s, have been gaining ground in recent years as a reliable solution that offers structural, economic, and environmental advantages.

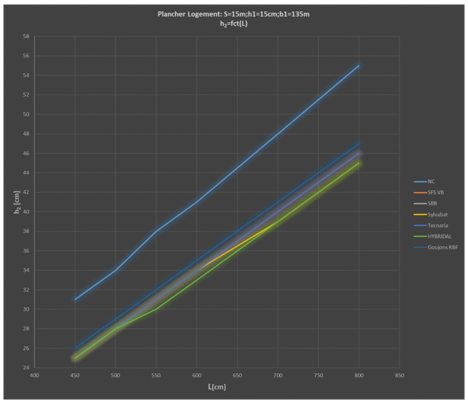
Mixed wood-concrete floors consist of a reinforced concrete slab bonded, via *a mechanical or chemical connector, to wooden joists below. This configuration makes it possible to make the best use of the properties of each material. In this way, a section capable of bearing more load than a wooden floor is created.*

Missions and goals

The design, at the end of this PFE, of an Excel calculation tool that will allow us to carry out a case study to detect the tendencies and the effectiveness of some connectors found on the market by varying dimensions and loads.

Abstract

The design of these floors is based on the γ method, presented in Annex B of Eurocode 5 and recommended by the technical assessments of connector manufacturers. This report is also based on a new draft of Eurocode 5, which takes into account mixed wood-concrete structures and presents common rules for the design and calculation of this type of structure.



Hauteur de la solive bois selon la portée
© Abdelouahed Boumarchid, 2021.

Éléments de bibliographie

LUKASZEWSKA, Elzbieta, 2009. *Development of prefabricated timber-concrete composite floors.* Thèse de doctorat : Timber Structures. Luleå, Suède : Luleå University of Technology.

Cyril MORANE

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Nuvia Structure

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Christian HONNORAT, chef de projet

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Marc QUIERTANT, chercheur, Université Gustave Eiffel

Confidentiel - durée illimitée - Confidentiel

Isolation sismique 3D

Mots-clés : isolation sismique, appareils d'appui, dynamique des solides

Contexte

L'isolation sismique constitue un enjeu majeur de conception des bâtiments industriels : des dispositifs intermédiaires assurent la connexion entre le bâtiment et le sol. Ces dispositifs ayant des raideurs faibles comparées à la rigidité du bâtiment, l'énergie sismique est reprise par la déformation des appuis, protégeant le bâtiment des accélérations induites par les séismes.

Missions et objectifs

La mission du projet de fin d'études est de poser le cadre d'une isolation sismique dans les trois directions de l'espace. Les bâtiments ciblés sont des centrales nucléaires, très rigides. À partir d'une idée de conception composée de deux appareils sismiques en série, l'objectif est de comprendre le comportement d'un bâtiment isolé dans les trois dimensions. L'objectif est de diminuer significativement l'influence des séismes verticaux sur les équipements.

Résumé

La première étape a consisté à comprendre et simplifier le problème, c'est-à-dire s'approprier les dispositifs sismiques existants. On comprend que le problème d'isolation sismique sur un bâtiment aussi rigide qu'une centrale nucléaire se résume à un problème de corps rigide à trois degrés de liberté, mais avec des amortissements plus complexes que pour un cas classique.

La seconde étape a consisté en l'étude du problème sous charges statiques de tous types. Cette étape a permis de comprendre les limitations en termes de raideur, et donc de fréquence d'isolation. En effet, un système isolé verticalement est sujet à du basculement, basculement d'autant plus important que la raideur est faible. Au bout de cette étape est établi le résultat d'un « effet taille », c'est-à-dire qu'une isolation sismique dans les trois dimensions de l'espace est d'autant plus facile à réaliser que le bâtiment à isoler est large : les fréquences propres admissibles diminuent avec la taille du bâtiment, ce qui est recherché pour isoler un bâtiment.

Deux « bâtiments d'étude » sont proposés, le premier étant un petit bâtiment isolable par la technologie actuelle, le second étant un plus gros bâtiment isolé au moyen d'une technologie non existante, mais accessible, qui profiterait plus de l' « effet taille »

La troisième étape consiste en l'étude dynamique des deux bâtiments d'étude sous cinq séismes différents. La méthode des modes complexes est utilisée pour résoudre l'équation de la dynamique.

Enfin, une quatrième étape consiste en la récupération des résultats pour étudier l'influence de cette isolation sur un équipement.

3D seismic isolation

Keywords: seismic isolation, bearings, dynamics of solids

Context

Seismic isolation is a major issue in the design of industrial buildings: intermediate devices ensure the connection between the building and the ground. Since these devices have low stiffness compared to the rigidity of the building, seismic energy is absorbed by the deformation of the supports, protecting the building from accelerations induced by earthquakes.

Missions and goals

The mission of the project is to study the possibility of seismic isolation in the three directions of space. The targeted buildings are nuclear power plants, which tend to be very rigid. Starting with a design idea composed of two seismic devices in series, the objective is to understand the behavior of an isolated building in three dimensions and to significantly reduce the impact of vertical earthquakes on equipment.

Abstract

The first step was to understand and simplify the problem as well as comprehend the behaviour of existing seismic devices. We can see that the problem of seismic isolation on a building as rigid as a nuclear power plant can be simplified to a problem of a rigid body with three degrees of freedom, but with more complex dampening than in a classic case.

The second step consisted of studying the problem under static loads of all types. This step enabled me to understand the limitations in terms of stiffness, and therefore of isolation frequency. In fact, a vertically isolated system is subject to rocking, which makes it all the more important that the stiffness be low. At the end of this step, the result of a "size effect" was established, that is to say, seismic isolation in the three dimensions of space is all the easier to achieve the wider the building is: the admissible natural frequencies decrease with the size of the building, which is the aim.

Two "study buildings" were proposed, the first being a small building that can be isolated using current technology, the second being a larger building isolated using non-existing but accessible technology, which would benefit more from the "size effect".

The third step was the dynamic study of the two study buildings under five different earthquakes. The complex modes method was used to solve the equation of dynamics.

Finally, a fourth step consisted of using the results to study the impact of this isolation on a piece of equipment.

Juan Cruz AVELLANEDA CUFRÉ

Élève ingénieur double diplôme

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
T/E/S/S atelier d'ingénierie

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Simon AUBRY, ingénieur associé

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Laurent BROCHARD, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Recherches de conception bas-carbone appliquée aux structures en charpente métallique

Mots-clés : ACV, charpente métallique, conception, structures, réemploi

Contexte

T/E/S/S atelier d'ingénierie est un bureau d'études spécialisé dans les façades et la conception de structures. Dans le cadre de ce projet de fin d'études (PFE) réalisé pendant la pandémie de Covid-19, j'ai participé au concours de conception-réalisation pour la couverture mobile du stade Suzanne Lenglen de Roland Garros et au projet « La maison LVMH – ATP » dans le cadre d'une mission de diagnostic de bâtiment et de potentiel de réemploi de la charpente métallique.

Missions et objectifs

Le PFE proposé à consisté à concevoir, utiliser et perfectionner des outils de conception et de justification pour les structures métalliques de bâtiment, afin de réduire leur empreinte carbone et plus généralement d'améliorer leur performance environnementale en appliquant l'Analyse du cycle de vie (ACV). Cette démarche sera appliquée à des études de cas réels correspondant à des structures déjà réalisées comme à des projets en cours. Il s'agira de collecter des informations concrètes sur les charpentes puis de faire du calcul détaillé de structure métallique aux éléments finis, en testant des options d'optimisation *via* une évaluation détaillée des dispositions constructives : nature des aciers, nombre et sections des barres, calcul détaillé et comparatif des modes d'assemblages, influence du traitement de surface, impact des méthodes de construction et de déconstruction, opportunité de réemploi.

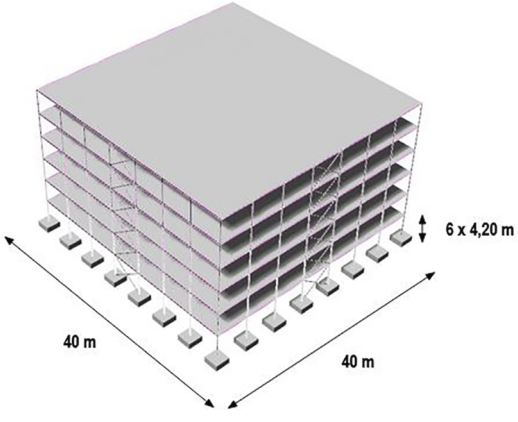
Résumé

Aujourd'hui le secteur de la construction est l'un des principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial.

Grâce au progrès de ces dernières décennies, principalement orienté vers la réduction de l'énergie opérationnelle des bâtiments, et à l'augmentation globale de la part des énergies renouvelables, nous constatons une diminution dans la consommation énergétique. Néanmoins, peu d'efforts ont été fournis pour améliorer l'énergie grise – sur laquelle les ingénieurs structure ont potentiellement plus d'influence.

Actuellement, le défi des ingénieurs structure est de se sensibiliser, de développer et d'adopter des pratiques pour concevoir des structures bas-carbone des projets d'échelles variées.

Ces réflexions sont au cœur de ce mémoire puisqu'il explore particulièrement les voies possibles pour concevoir des structures en acier moins carbonées. Nous étudierons les économies potentielles en CO_2 que nous pouvons atteindre à partir des choix qui se présentent aux ingénieurs au cours de la conception d'un projet, en considérant notamment la solution du réemploi.



Modélisation 3D d'un bâtiment à ossature métallique à partir de Grasshopper © Juan Cruz Avellaneda Cufré, 2020.

Low-carbon design research applied to steel structures

Keywords: LCA, steel structures, structural design, reuse

Context

T/E/S/S atelier d'ingénierie is a design office specialized in facades and structural design. This PFE was carried out during the Covid-19 pandemic with a large part of it in virtual mode. Nevertheless, the T/E/S/S team managed very its organization very well. I participated in the design-build competition for the mobile cover of the Suzanne Lenglen Stadium of Roland Garros and in the project "La maison LVMH – ATP" in the context of a building diagnosis and potential reuse of the steel structure.

Missions and goals

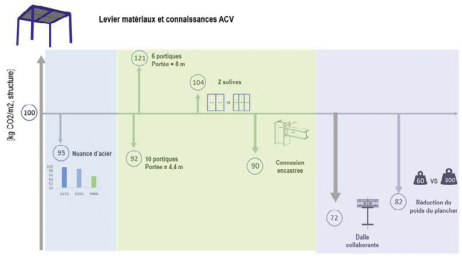
This PFE consisted of designing, using, and improving design and justification tools for building steel structures with the goal of increasing their environmental performance by applying Life Cycle Analysis (LCA). These tools were then applied to actual case studies, consisting of structures already built as well as projects in progress. Concrete information on the structures was collected and used to perform detailed finite element calculations of the steel structure, testing optimization options. A detailed evaluation of the constructive provisions was performed, including the nature of the steels, the number and sections of the bars, the modes of assembly, the influence of the surface treatment, the impact of the methods of construction and deconstruction, and the opportunities of reuse.

Abstract

The construction sector is one of the main contributors to global greenhouse gas emissions.

Thanks to progress made over the last decades, mainly oriented towards the reduction of the operational energy of buildings, and thanks to the global increase in the share of renewable energies, we are witnessing a decrease in energy consumption. Nevertheless, little effort has been made to address the issue of grey energy – on which structural engineers potentially have more influence. Currently, the challenge for structural engineers is to become aware of, develop, and adopt practices to design low-carbon structures for projects of various scales.

These consderations are at the core of this thesis, as it specifically explores ways to design less carbon intensive steel structures by studying the potential CO2 savings that can result from choices made by engineers during the design of a project, particularly regarding the solution of reuse.



Leviers d'action concernant les matériaux et les connaissances ACV © Juan Cruz Avellaneda Cufré, 2020.

Éléments de bibliographie

ADAMS, Matthew, BURROWS, Victoria, RICHARDSON, Stephen *et al.*, 2019. *Bringing embodied carbon upfront. Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*, Toronto: World Green Building Council, 35 p.

Baptiste MENDES

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Centre Efficacité Énergétique des Systèmes (CES), Mines ParisTech

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Bruno PEUPORTIER, directeur de recherche

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Christophe PENIGUEL, responsable de module, EDF R&D

École des Ponts ParisTech

Influence de la structure et de sa forme sur la performance environnementale des quartiers

Mots-clés : écoconception des bâtiments, forme architecturale, phase esquisse, simulation thermique dynamique (STD), analyse de cycle de vie (ACV)

Contexte

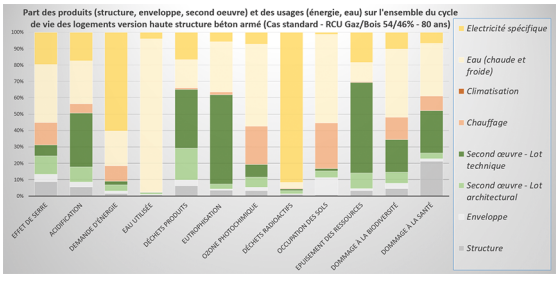
L'écoconception des bâtiments – secteur émettant 20 % du CO_2 français – se généralise avec le recours aux outils STD et ACV. Mais ils sont généralement utilisés en phase avancée pour le respect des réglementations. Or les décisions influençant le plus la performance environnementale sont souvent prises en amont. Ainsi, utiliser ces outils au plus tôt permet d'identifier les priorités et guider le sens de la conception. Au CES, une démarche d'optimisation de la forme des quartiers – selon différents indicateurs environnementaux – basée sur ces outils est en cours de développement. Il est donc nécessaire de mener une étude préalable, afin de juger de l'importance d'une estimation précise des quantités de matériaux de structure et proposer une méthode simple d'intégration.

Missions et objectifs

Le premier objectif est de développer la méthode d'estimation en phase esquisse selon la forme du bâtiment. Des articles et exemples de bâtiments construits ont donc été étudiés pour estimer la masse de béton, armatures, bois par m² de surface selon le nombre d'étages et le type de structure (ossature/paroi). Le second objectif est d'appliquer la méthode à un grand projet d'éco-quartier afin de comparer les impacts environnementaux de la structure à ceux du cycle de vie et évaluer leur variation relative selon la forme.

Résumé

Ce développement a mis en évidence la nécessité d'intégrer une quantification adaptée des matériaux de structure par unité de surface selon le nombre d'étages dans la démarche d'optimisation ACV envisagée au CES. Différences significatives entre les structures « basses et hautes » béton et bois sont observées à l'échelle des impacts du cycle de vie. L'application au projet a permis d'identifier la part des matériaux – structure, enveloppe, CVC, 2nd œuvre – et des usages – eau, chauffage, clim, électricité – sur les impacts du cycle de vie des bureaux et logements pour douze indicateurs. Dans le cas de matériaux et scénarios d'usage standards (voir illustration), la part des postes influencés par la forme reste inférieure de 40 % sur tous les indicateurs dont quatre – déchets, eau, épuisement ressources, eutrophisation – y sont très peu sensibles. Enfin, les impacts de l'esquisse initiale ont été comparés à ceux de deux esquisses simplifiées (une version basse < R+14 et une haute > R+22) avec une différence notable sur l'effet de serre (– 5 % entre bureaux béton, jusqu'à – 20 % en structure bois certifié) et dommages santé (de – 10 à – 16 %). Cependant, en cas de passage de la structure béton au bois, une augmentation des dommages biodiversité (+ 22 %) liées à une hausse de l'occupation des sols (+ 43 2 %) est observée.



Part des produits et usages sur l'ensemble du cycle de vie (80 ans) du projet de logements version haute structure béton
© Baptiste Mendes, 2021.

Influence of structure and its shape on the environmental performance of neighborhoods

Keywords: eco-design of buildings, architectural shape, sketch stage, dynamic thermal simulation (DTS), life cycle assessment (LCA)

Context

The eco-design of buildings – the construction sector emitting ~ 20% of French CO_2 – is becoming widespread, especially using DTS and LCA tools. However, these tools are usually employed in the advanced stages of a project in order to respect regulations, whereas the most important decisions influencing environmental performance are often taken at an upstream stage. Therefore, using these tools sooner allows to identify priorities and lead the design in this way. At the CES, an optimization approach of building shape, based on these tools and taking into account different environmental indicators, is currently under research. In this context, a preliminary study is needed to provide an accurate estimation of structural material quantities to and propose a simple method of integration.

Missions and goals

The first goal was to develop the estimation method at the sketch stage according to buildings shapes. For this, articles and examples of achieved buildings were studied to estimate the weight of concrete, rebar steel, and timber per unit of area as a function of the number of stories and structural type (frame/wall). The second goal was to apply the method to a large eco-neighborhood project in order to compare the environmental impacts of the structure to the impacts of the whole life cycle and assess relative variation according to shape.

Abstract

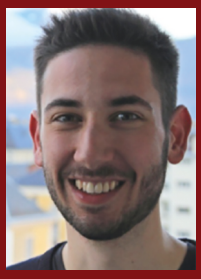
This research highlighted the necessity to achieve an adapted quantification of structural materials per unit of area according to the number of stories as part of the LCA optimization approach intended by the CES. Significant differences between "low and high" concrete and timber structures were observed at the scale of the whole life cycle impacts. The application of the project allowed the identification of the share of each material involving the structure, envelope, MEP, and finishing; as well as different usages, namely water, heating, cooling, and electricity; on the whole life cycle impacts of offices and housing units according to 12 indicators. In the case of standard materials and usage scenarios (see figure), the share of categories influenced by the shape stays < 40% on all the indicators whose four criteria of waste, water, resource depletion, and eutrophication do not vary significantly with the shape. In conclusion, the impacts of the initial sketch were compared to those of two simple sketches (1 low version < 14 stories and 1 high > 22 stories), with significant differences observed regarding climate change (– 5% with concrete offices, up to – 20% with certified timber structures) and health damages (from – 10 to – 16%) but, in the case of a passage from concrete to timber structures, an increase of biodiversity damages (+ 22%) linked to a rise of land occupation (+ 432%).

Éléments de bibliographie

DE WOLF Catherine, 2014. *Material quantities in building structures and their environmental impact*. Mémoire de thèse : Master of Science in Building Technology. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology.

SKULLESTAD, Julie Lyslo, BOHNE, Rolf André et LOHNE, Jardar, 2016. High-rise timber buildings as a climate change mitigation measure – A comparative LCA of structural system alternatives. *Energy procedia*, septembre 2016, n° 96, pp.112-123.

THIRUVENGADAM, V., GUITE, Thangmuansang, THAKRE, Rishi K. *et al.*, 2018. Quantity estimation of structural materials in reinforced concrete buildings designed for seismic effects. *In*: EAEE, ETAM et ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI. *16th European conference in earthquake engineering*, 18-21 juin 2018, Thessalonique : Thessaloniki Concert Hall.



Louis SUCHIER

Élève ingénieur concours commun
Parcours Aménagement et infrastructures

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
EDF Hydro – Centre d'Ingénierie Hydraulique

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Emmanuel ROBBE, spécialiste barrages béton

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Michel GUERINET, enseignant, École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Caractérisation de la réponse des voûtes à des sollicitations thermiques exceptionnelles

Mots-clés : hydraulique, barrages, changement climatique, énergie, surveillance

Contexte

Depuis 2018, les voûtes « sensibles thermiquement » doivent faire l'objet de calculs en situation saisonnière décennale d'exploitation. En effet, pour ces voûtes, les déplacements dus aux canicules et aux grands froids sont important en comparaison des déplacements annuels saisonniers. Ce projet de fin d'études (PFE) vise à l'élaboration d'une méthodologie statistique et numérique afin de caractériser au mieux la réponse des voûtes à ces sollicitations thermiques exceptionnelles.

Missions et objectifs

Les missions du PFE sont les suivantes :

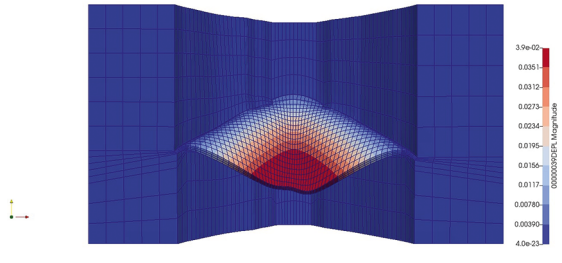
- Définir concrètement ce qu'est un chargement thermique décennal sur une voûte, statistiquement et numériquement ;
- L'implémenter numériquement ;
- Se donner des ordres de grandeur de l'impact de ces scénarios sur le comportement des voûtes ;
- Élaborer une méthodologie simplifiée dans le cas où la voûte est peu auscultée.

Résumé

En 2018, le CFBR a publié les recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages voûtes. Dans ce document, il est explicité que des études complémentaires aux études « historiquement » réalisées doivent être effectuées pour les voûtes dites « sensibles thermiquement », en particulier des calculs de situations saisonnières décennales d'exploitation. En effet, les déplacements observés – certes réversibles – provoqués par des canicules ou des grands froids, sont d'un ordre de grandeur non négligeable par rapport aux déplacements annuels saisonniers.

En outre, aucune méthode existante ne permet de définir avec certitude un chargement décennal de manière rigoureuse et précise. C'est pour ces raisons que la définition de scénarii majorés uniformes pour l'ensemble des barrages-voûtes d'EDF est un enjeu fondamental pour les années à venir, notamment dans le cadre des Études de Danger (EDD). Cela a donné lieu à l'élaboration d'une méthodologie statistique et numérique afin de caractériser au mieux la réponse des voûtes à ces sollicitations thermiques exceptionnelles.

La mise au point de cette méthodologie requiert d'abord des connaissances statistiques, afin de comprendre comment sont traitées les données d'auscultation et de cibler les chargements thermiques à appliquer aux voûtes dans de telles situations. Elle nécessite aussi des connaissances techniques concernant le comportement du béton, mais aussi au sujet de la constitution, du fonctionnement et de l'auscultation des barrages. Enfin, des compétences numériques doivent permettre de faire le lien entre ces connaissances pour implémenter le scénario majoré.



Déformée de l'ouvrage sous chargement thermique décennal
© Louis Suchier, 2021.

Characterization of the response of vaults to exceptional thermal stresses

Keywords: hydraulics, dams, climate change, energy, surveillance

Context

Since 2018, "thermally sensitive" vaults have to be calculated every 10-year operating season. But actually, for such vaults, the displacements due to heat waves and severe cold can be more important than annual seasonal displacements. This PFE aims at the development of a statistical and numerical methodology to best characterize the response of vaults to these exceptional thermal stresses.

Missions and goals

The missions of the PFE are:

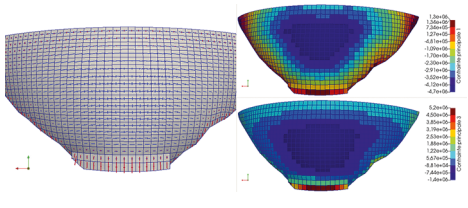
- *To concretely define the decennial heat charge on a vault, statistically and numerically;*
- *To implement it digitally;*
- *To provide orders of magnitude for the impact of certain scenarios on the behaviour of the vaults;*
- *To develop a simplified methodology in cases where the vault is poorly tested.*

Abstract

In 2018, the CFBR published its draft recommendations for the justification of the behaviour of vaulted dams. The document maintains that new studies, complementary to "historical" ones, must be carried out for so-called "thermally sensitive" vaults, in particular calculations of decennial seasonal operating conditions. Indeed, the displacements caused by heat waves or severe cold, while certainly reversible, are of a non-negligible order of magnitude compared to seasonal annual movements. In addition, there is no existing method to definitively state a 10-year load in a rigorous and accurate manner.

It is for these reasons that the definition of uniform increased scenarios for all EDF vaulted dams is a fundamental challenge for the coming years, particularly in the context of Danger Studies (EDD). This challenge has led to the elaboration of a statistical and numerical methodology in order to best characterize the response of the vaults to these exceptional thermal stresses.

The development of this methodology firstly requires statistical knowledge in order to understand how the auscultation data are processed and to target the thermal loads to be applied to the vaults in such situations. It also requires technical knowledge about the behaviour of concrete, but also about the construction, operation, and testing of dams. Finally, digital skills are needed to apply this knowledge to the enhanced scenario.



Rosettes de contrainte amont de l'ouvrage sous chargement thermique décennal © Louis Suchier, 2021.

Louis WIART

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
EMULITHE – Fosses & Aubervilliers

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Cyril MAGNIN-FEYSOT, chef de secteur Aubervilliers

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Romain ALLAIN, responsable de module, UTI Seine Amont, Direction territoriale du bassin de la Seine

École des Ponts ParisTech

Évaluer et valoriser l'approche RSE d'une agence VRD

Mots-clés : VRD, impact environnemental, RSE, bilan carbone, numérique

Contexte

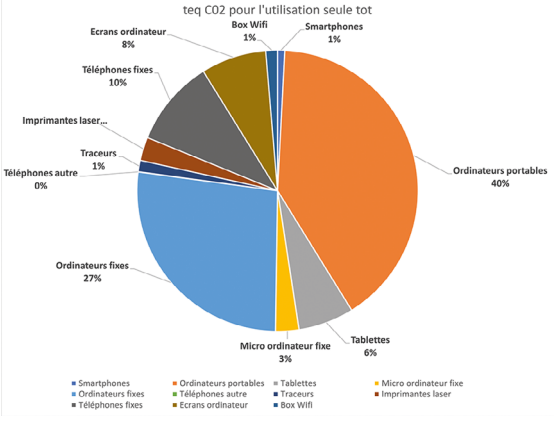
L'Agence EMULITHE cherche à mettre en œuvre une démarche triple évaluer/agir/valoriser portant sur les dispositions qui relèvent de la Responsabilité sociétale des entreprises (RSE) au niveau du plus petit échelon du groupe Eurovia : celui d'une agence travaux. 2021 constitue une année charnière pour la mise en œuvre de cette démarche, afin de se conformer à la vision stratégique du groupe pour 2030 et d'anticiper les évolutions du secteur des Travaux Publics. Par ailleurs, pendant la crise sanitaire, certains usages au sein de l'agence ont été profondément transformés, notamment ceux qui relèvent du numérique. L'utilisation croissante des outils numériques a besoin d'être étudiée et quantifiée au travers d'un prisme environnemental.

Missions et objectifs

La démarche d'évaluation est mise en œuvre par le biais d'un audit sur les initiatives RSE de l'agence, impliquant la réalisation de bilans carbone sur certains chantiers. L'évaluation des usages informatiques est effectuée collectivement avec plusieurs collaborateurs du groupe. L'idée est de proposer une méthode de réplication simple et gratuite de cet audit pour évaluer à terme l'empreinte informatique dans toutes les agences travaux du groupe. L'évaluation aboutit ensuite naturellement à des actions concrètes, associées à la mise en place des quatre projets de l'agence pour le Grand Prix de l'Environnement VINCI. En phase étude, il est apparu pertinent d'adapter la structure et le contenu des réponses aux appels d'offres. La finalité de cette démarche est donc la valorisation de l'agence vis-à-vis de ses clients, l'émulation des collaborateurs sur des sujets qui les concernent au quotidien et la mise en place de bonnes pratiques qui pourront ensuite être étendues à d'autres agences d'Eurovia et de VINCI.

Résumé

La réalisation de l'audit de RSE au sein de l'agence a facilité l'obtention d'un label auprès du principal syndicat professionnel des Travaux Publics en France et a alimenté le référentiel existant au sein du groupe. L'audit a également permis de quantifier des mesures fonctionnelles permettant de réduire l'empreinte environnementale sur les chantiers et au sein de l'agence, ainsi que d'identifier des pistes d'amélioration dans certains domaines. Les résultats de l'étude portant sur les usages numériques permettent de comprendre les principaux postes d'émission et d'établir une ligne directrice pour la réduction de l'empreinte numérique par le biais d'un ensemble de propositions. La mise à disposition d'un outil permettant de répliquer l'étude et d'un guide de bonnes pratiques valorise la démarche pour le groupe.



Répartition des équivalents CO_2 émis par l'utilisation des équipements informatiques au sein d'EMULITHE en 2020 © Louis Wiart, 2021.

Assess and enhance the ESG approach of a public works agency

Keywords: road and networks construction, environmental impact, ESG, carbon footprint, digital

Context

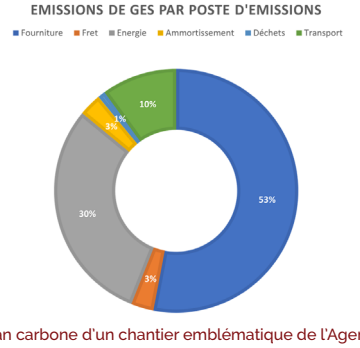
The EMULITHE Agency has been carrying out a triple approach of "assess / act / enhance" relating to Environmental Social Governance (ESG) at the smallest level of the VINCI group, a public works agency. 2021 is a pivotal year regarding this approach in order to comply with the group's ambitious 2030 strategic vision and objectives, and to foresee the evolutions of the Public Works sector. Moreover, during the Covid-19 crisis, uses and practices deeply changed and adapted to digital transformation: new tools have been developed to manage construction sites, dealing with inputs and outputs, and collaborators have become used to more flexible working conditions. The increasing use of these digital tools needs to be quantified through an environmental lens.

Missions and goals

The assessment process is implemented through an audit of EMULITHE's ESG initiatives and assesses the carbon footprint of several construction sites. The environmental assessment of IT usage at EMULITHE is carried out in collaboration with the group's IT department. The aim is to offer a simple and free replication method of this audit to ultimately assess the IT footprint of every one of VINCI's works agencies. Assessment then naturally leads to concrete actions, in particular the implementation of the agency's four projects for the VINCI Environmental Grand Prix. The final purpose of this approach is enhancement for EMULITHE and more generally for the VINCI Group. At the scale of EMULITHE, this means highlighting ESG-focused approaches and commitments in response to calls for bids (technical memory frames, carbon assessments). At the VINCI group level, it implies contributing to the group's environmental framework. A further goal is to provide other agencies with a simple tool to assess the carbon footprint of their digital usage.

Abstract

The ESG audit enabled EMULITHE to obtain recognition from a label supported by France's main Public Works professional association and extended the existing frame for dealing with ESG issues within the VINCI Group. The audit also enabled EMULITHE to quantify existing and experimental measures to reduce the carbon footprint of construction sites and within offices. EMULITHE was able to identify challenges and fields of improvement. As for the digital usage study, the results provided relevant information regarding the main carbon emission sources and led to the design of a strategy to reduce the digital carbon footprint through several propositions. By providing VINCI Group with a simple tool for replicating the study and with a guide of good practices, this end-of-studies project enhances EMULITHE's approach for the whole group.



Bilan carbone d'un chantier emblématique de l'Agence à Villetaneuse : bilan par poste d'émissions
© Louis Wiart, 2021.

Éléments de bibliographie

LHOTELLIER, Johan, LESS, Etienne, BOSSANNE, Emilie *et al.*, 2017. *Modélisation et évaluation du poids carbone de produits de consommation et biens d'équipements*. Rapport. S. L. : ADEME, 217 p.

MAUREY, Hervé, CHAIZE, Patrick, 2020. *Rapport d'information fait au nom de l'aménagement du territoire et du développement durable par la mission d'information sur l'empreinte environnementale du numérique*. Sénat. Session ordinaire de 2019-2020, n° 555. Paris : Sénat, Commission de l'aménagement du territoire et du développement durable.

Íñigo CANALES GARCÍA

Élève ingénieur double diplôme
ETSICCP de Santander, Universidad de Cantabria, Espagne

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Egis Rail (au sein du groupement Egis/Tractebel pour la MOE de la L16 du Grand Paris Express)

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Jean-Philippe SABATIER, responsable marché adjoint

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Jean-Michel PEREIRA, directeur adjoint, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Rétroanalyse des déformations des parois moulées : méthodes de calcul et inclinomètres

Mots-clés : Grand Paris Express, ligne 16, parois moulées, modèles aux éléments Finis, inclinomètre

Contexte

Ce projet de fin d'études s'est déroulé au sein du projet du Grand Paris Express, qui consiste en la construction de 200 km de ligne de métro et 68 nouvelles gares. Cette étude cible le comportement du soutènement de certains ouvrages exécutés avec des parois moulées dans le Lot 1 de la Ligne 16 au Nord de Paris, réalisé par le groupement Eiffage/TSO, sous la maîtrise d'ouvrage de la Société du Grand Paris, et sous la maîtrise d'œuvre du groupement Egis/Tractebel (l'organisme d'accueil pendant le déroulement de ce projet de fin d'études).

Missions et objectifs

La réalisation de ces travaux souterrains est fortement contrainte par la présence d'avoisinants, puisque les seuils de déformations sur les avoisinants sont ceux qui dimensionnent les parois moulées *via* ses déplacements limites.

Par conséquent, ce projet de fin d'études cherche à approfondir la compréhension du comportement des parois moulées en analysant les limites des méthodes de calcul des déformations utilisées, pour ensuite confronter leurs résultats avec des mesures réelles issues des inclinomètres installés dans plusieurs ouvrages de la L16.

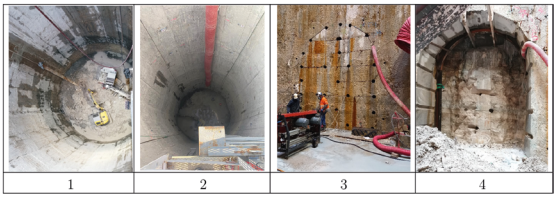
Résumé

Le projet vise en particulier l'étude du comportement de certains ouvrages annexes en forme de puits circulaire, avec un rameau de connexion au tunnel. Trois axes de développement majeur ont été menés, afin d'avoir une image la plus complète possible de l'enjeu.

D'abord, une analyse des modèles de calcul, du type MISS-K (modèles d'interaction sol-structure avec des coefficients de réaction K), qui ont été établis en phase de conception et également en phase d'exécution, a été effectuée : hypothèses prises en compte, conservatismes, pertinence des paramètres, *etc.* Un modèle additionnel en éléments finis (MISS-EF) est construit afin de vérifier si les déformations calculées avec cette méthode sont similaires.

Ensuite, le retour d'expérience chantier a été considéré : la mise en œuvre des tubes inclinométriques dans les cages des armatures, la méthode de mesure des déformations sur place avec des inclinomètres, les erreurs de mesure plus fréquents, et sa dépose à la fin des travaux.

Finalement, on a étudié les données des déformations des inclinomètres dans les ouvrages, tels que mesurés sur site. Une retro-analyse est effectuée par la suite (en tenant compte de nos recherches au préalable sur le comportement des parois moulées selon les modèles de calcul, et sur les méthodes d'exécution réelles sur chantier) afin de déterminer les sources des écarts trouvés.



Travaux critiques pour le comportement de la paroi en phase chantier : terrassement du puits (photos 1 et 2, puits 0210P), carottage et sciage à câble de la paroi pour ouverture du rameau (photo 3, puits 6301P) et dépose des blocs pour ouverture complète et début du creusement en traditionnel (photo 4, puits 6301P) © Iñigo Canales-Garcia, 2021 (source : photos suivi du chantier).

Retroanalysis of diaphragm wall deformations: calculation methods, inclinometers

Keywords: Grand Paris Express, line 16, diaphragm wall, FEM modelling, inclinometer

Context

This end-of-studies project takes place within the Grand Paris Express project, which consists of the construction of 200 km of metro lines and 68 new stations. The study targets the behavior of some structures with diaphragm walls in Lot 1 of Line 16 in the north of Paris, executed by the Eiffage/TSO construction group. The Client is the Société du Grand Paris, and the Project Manager is the Egis/ Tractebel group (the host company during this end-of-studies project).

Missions and goals

These underground works are strongly constrained by the presence of adjacent structures, since the thresholds of deformation of these adjacent structures finally determine the possible deformations of diaphragm walls via their displacement limitations. Consequently, this end-of-studies project seeks to deepen our understanding of the behavior of the diaphragm walls by analyzing the limits of current methods for calculating deformations, and comparing their results with real measurements taken from inclinometers installed in several structures that are part of the L16.

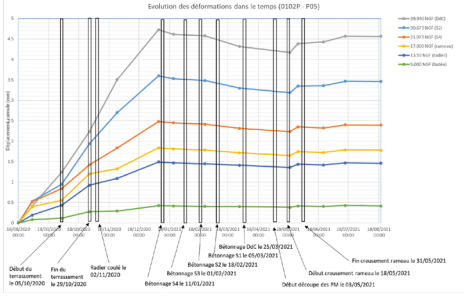
Abstract

The project aims to study the behavior of certain diaphragm wall structures that take the form of circular shafts with a connection gallery to the tunnel. Three major lines of research have been carried out to obtain the most complete assessment of the issue:

First, an analysis was conducted of the calculation models MISS-K (soil-structure interaction models with reaction coefficients K), which were established in the design phase as well as the execution phase. The analysis was based on factors such as assumptions taken into account, conservatisms, and the relevance of the parameters. An additional finite element model (MISS-EF) was built in order to check if the deformations calculated with this method were comparable.

Then, the feedback from the construction sites was taken into account regarding the placement of inclinometer tubes in diaphragm walls, the method of measuring in-site deformations with inclinometers, the mo frequent measurement errors, and the removal of inclinometers at the end of the works.

Finally, the data on deformations, as measured by the inclinometers, was studied. A retro-analysis was then performed (taking into account our previous research on the behavior of diaphragm walls according to calculation models and on the real execution methods on site) in order to determine the sources of the discrepancies found.



Évolution des déformations de la paroi moulée (panneau P05) du puits 0102P mesurées avec inclinomètre (graphique type 2) © Iñigo Canales-Garcia, 2021 (source : élaboration propre à partir des données d'auscultation de Cementys).

Éléments de bibliographie

BIGOT, Gérard, 1997. Les mesures à l'inclinomètre. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, juillet-août 1997, n° 210, p. 127-131. Notes techniques.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2003. *Ouvrages de soutènement. Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des parois moulées et préfabriquées*. Paris : LCPC, 68 p.

MIKKELSEN, P. Erik, 2003. Advances in Inclinometer Data Analysis. *In*: MYRVOLL, Frank (ed.). *Field Measurements in Geomechanics: Proceedings of the 6th International Symposium, Oslo, Norway, 23-26 Septembre 2003*, CRC Press, pp. 555-568.

Rabeb CHROUD

Élève ingénieure double diplôme
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), Tunisie

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Egis Géotechnique

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Alexandre GIROUX, chef de projet confirmé

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Roger FRANK, enseignant, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Contribution à la conception et au dimensionnement géotechnique de gares enterrées

Mots-clés : Grand Paris Express, géotechnique, paroi moulée, excavations profondes

Contexte

Dans l'objectif de transformer l'agglomération parisienne en une grande métropole du XXIe siècle, la présidence de Nicolas Sarkozy a initié en 2007 le projet du Grand Paris Express. Il s'appuie sur la création d'un réseau de transports publics, notamment souterrains, à travers la création des 4 nouvelles lignes de métro 15, 16, 17 et 18 ainsi que le prolongement de la ligne 14 au nord et au sud. La réalisation de ce projet exige de faire des gares très profondes dans des zones géologiques différentes. Ces ouvrages retenus par des écrans en béton armé doivent respecter deux critères majeurs. Le premier est lié à la stabilité de l'ouvrage et son impact sur son environnement et les avoisinants selon leur sensibilité. Le deuxième est lié aux contraintes budgétaires de ce projet.

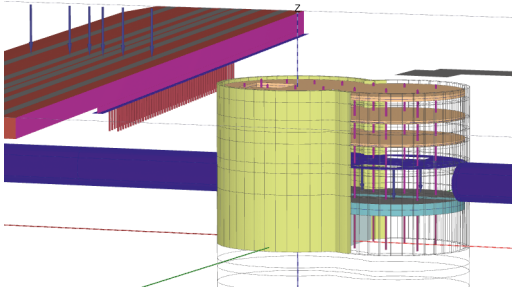
Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études (PFE) est d'approfondir la compréhension du comportement des parois moulées en analysant les méthodes de modélisation, à savoir la méthode des coefficients de réaction et la méthode des éléments finis 2D et 3D. Dans cette optique, il faut être conscients des hypothèses géotechniques et hydrogéologiques à la base de ces méthodes de modélisation. Une analyse est donc menée sur les déplacements, les efforts dans les appuis, les tassements prédits par les modélisations aux éléments finis et la butée au niveau de la fiche de l'écran.

Résumé

Le projet du Grand Paris Express comporte de nombreuses nouvelles gares et ouvrages annexes qui présentent des formes géométriques simples et complexes. Ce travail propose une analyse des calculs sur une des gares de la ligne 16, la gare de Chelles. L'objectif est d'améliorer la connaissance des trois méthodes de calcul : méthode aux coefficients de réaction MISS-K (RIDO) et méthodes aux éléments finis (EF) en deux et trois dimensions (PLAXIS 2D et 3D) ; et ainsi d'approfondir la compréhension de leur particularité.

Cette étude permet d'analyser les résultats de calculs de chaque méthode, afin de préciser les points communs ainsi que les divergences entres les comportements des parois au niveau de différentes coupes et types de calcul. Elle montre le caractère indispensable des calculs aux éléments finis et en 3D, et permet d'identifier les limites de chaque méthode de calcul.



Modèle EF-3D de la gare de Chelles (ligne 16, lot 3)
© Rabeb Chroud, 2021.

Contribution to the design and geotechnical dimensioning of underground stations

Keywords: Grand Paris Express, geotechnics, diaphragm walls, deep excavations

Context

With the aim of transforming the Paris conurbation into a major metropolis of the 21st century, Nicolas Sarkozy's presidency initiated the Grand Paris Express project in 2007. The project entails the creation of a public transport network, particularly underground, through the creation of 4 new metro lines (15, 16, 17, and 18) and the extension of line 14 to the north and south. The realisation of this project requires the construction of very deep stations in different geological zones. These structures, which are supported by reinforced concrete screens, must meet two major criteria. The first is related to the stability of the structure and its impact on the environment and the surrounding area, depending on sensitivity. The second is related to the budgetary constraints of the project.

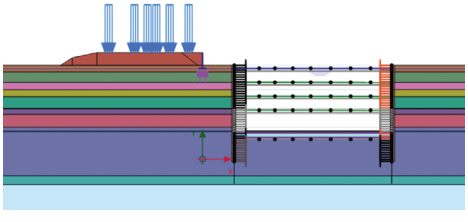
Missions and goals

The objective of this final year project (PFE) is to deepen our understanding of the behaviour of diaphragm walls by analysing different modelling methods, namely the reaction coefficient method and the 2D and 3D finite element methods. To achieve this goal, it is necessary to know the basic geotechnical and hydrogeological assumptions of these modelling methods. Therefore, an analysis is carried out regarding the displacements, the forces in the supports, the settlements predicted by finite element modelling, and the stop at the screen plug.

Abstract

The Grand Paris Express project includes many new stations and ancillary structures with simple and complex geometrical shapes. This work proposes an analysis of the calculations on one of the stations of the line 16, the station of Chelles. The objective is to improve our knowledge of the three calculation methods, namely the MISS-K (RIDO) subgrade reaction coefficient method and the 2D and 3D finite element methods (PLAXIS), thereby deepening our understanding of their particularities.

These studies allow us to analyze the calculation results of each method, which in turn enables us to specify the commonalities as well as the divergences in the behaviours of the walls at the level of different sections and according to different types of calculation. The studies also demonstrate the indispensability of finite element calculations, especially in 3D, as well as the limits of each calculation method.



Modèle EF-2D de la gare de Chelles (ligne 16, lot 3)
© Rabeb Chroud, 2021.

Éléments de bibliographie

Daktera, Tomasz, 2020. *Évaluation des méthodes de calcul des écrans de soutènement à partir du retour d'expérience de grands travaux récents*. Thèse de doctorat : Géotechnique. Champs-sur-Marne : université Paris-Est.

Delattre, Luc, 2004. Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement : La modélisation des écrans de soutènement par la méthode des éléments finis. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, septembre 2004, n° 252-253, pp. 95-117.

Nejjar, Khadija, 2019. *Comportement des parois de soutènement dans un contexte exceptionnel (grande profondeur, formations déformables, environnement sensible). Application à la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart du Grand Paris Express et comparaison avec les mesures réalisées sur site*. Thèse de doctorat : Matériaux, Mécanique, Génie civil, Électrochimie. Saint-Martin-d'Hères : université Grenoble Alpes.

Anas HAFID

Élève ingénieur double diplôme
École Hassania des Travaux Publics, Casablanca, Maroc

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Artelia

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Luc HAMM, directeur technique maritime

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pablo TASSI, ingénieur-chercheur, EDF R&D

École des Ponts ParisTech

Validation du projet de nouvel Eurocode EN1991-1-8

Mots-clés : accropode, digues à talus, Eurocode, étude de fiabilité

Contexte

Ce projet de fin d'études s'intègre dans le cadre des travaux de rédaction et de validation du nouvel Eurocode EN 1991-1-8 *Actions des vagues et des courants sur les structures côtières*, ainsi que d'une annexe A.6 de l'Eurocode 0 sur le dimensionnement des structures côtières.

Missions et objectifs

Ce projet avait pour but de valider le nouvel Eurocode, et aussi d'évaluer le niveau de fiabilité d'une carapace de digue à talus. Les missions sont les suivantes :

- recalculer des ouvrages existants en appliquant les nouvelles règles de l'Eurocode ;
- développer un outil de vérification probabiliste de la stabilité hydraulique d'une digue à talus.

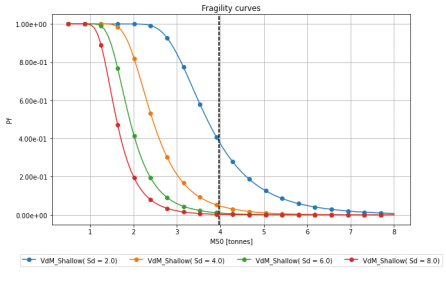
Résumé

L'approche semi-probabiliste des coefficients partiels voulu par les Eurocodes consiste en un système de coefficients partiels appliqués aux différents termes des équations servant à vérifier la stabilité des ouvrages, et ensuite, à vérifier l'équilibre entre les sollicitations majorées par les coefficients d'actions et les résistances minorées par les coefficients de résistance. Le passage des pratiques actuelles de conception de digue à talus à l'approche semi-probabiliste de l'Eurocode nécessitera le calage des valeurs des coefficients partiels pour que les ouvrages côtiers ne soient pas sensiblement modifiés par le changement des méthodes de justification.

Le calage nécessite l'évaluation de la fiabilité des digues existantes, et le recours aux méthodes probabilistes. Ces méthodes consistent à évaluer la probabilité de défaillance d'un ouvrage pour un mode de ruine donné, et de comparer ensuite cette probabilité à niveau de risque acceptable.

La défaillance d'une digue à talus par les agents hydrauliques est le résultat d'un ou plusieurs modes de ruine qui ont été répertoriés par exemple dans le Rock Manual.

Nous avons exploré dans notre travail la défaillance de la carapace du talus côté mer par une tempête, et nous avons évalué les indices de fiabilité d'une digue en enrochements, et d'une digue en Accropodes.



Courbes de fragilité par rapport à la défaillance d'une carapace en enrochement sous l'action d'une tempête © Anas Hafid, 2021.

Validation of the draft of the new Eurocode EN1991-1-8

Keywords: accropode, breakwaters, Eurocode, reliability analysis

Context

This project focuses on the validation of the new Eurocode rules for breakwaters in terms of semi-probabilistic and probabilistic design approaches. The present work is part of the new Eurocode project on wave and current actions on coastal structures.

Missions and goals

The purpose of this project was to validate the new Eurocode, and also to evaluate the reliability level of breakwaters. The missions were the following:

- *Recalculate existing structures by applying the new Eurocode rules;*
- *Develop a probabilistic verification tool for the hydraulic stability of a breakwater.*

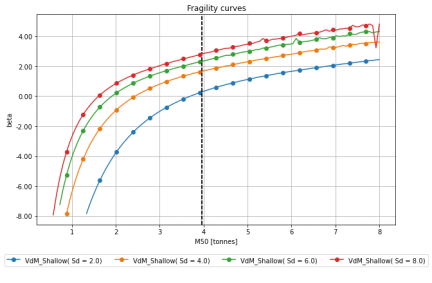
Abstract

The semi-probabilistic approach of partial coefficients desired by the Eurocodes consists of a system of partial coefficients applied to the different terms of the equations used to assess the stability of structures, followed by an assessment of the balance between the solicitations increased by the action coefficients and the resistances reduced by the resistance coefficients. The transition from the current practices of breakwater design to the semi-probabilistic approach of the Eurocode will require the calibration of the values of the partial coefficients so that coastal structures are not significantly modified by the change in justification methods.

The calibration requires an evaluation of the reliability of existing breakwaters, and hence the use of probabilistic methods. These methods consist of evaluating a structure's probability of failure according to a given failure mode, and then measuring this probability against an acceptable level of risk.

The failure of a breakwater due to hydraulic agents can occur according to one or more failure modes listed, for example, in the Rock Manual.

This study explores the failure of seaside armour as induced by a storm and evaluates the reliability indices of a rubble mound breakwater and an Accropod breakwater.



Indices de fiabilité d'une carapace en enrochement sous l'action d'une tempête © Anas Hafid, 2021.

Éléments de bibliographie

Burcharth, Hans F., 1992. Introduction of partial coefficients in the design of rubble mound breakwaters. *In*: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, *Coastal structures and breakwaters*. Londres : Thomas Telford, pp. 543-566.

PATURLE, Jean-Marc, Vincent G. et Vallon D., 1986. Digue à talus : une nouvelle génération de blocs. *Annales des ponts et chaussées*, n° 37, pp. 34-40.

S. N., 2009. *Guide Enrochement : L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*. Compiègne, Pays-Bas, Londres : CETMEF, CUR building infrastructure, CIRIA, 1302 p.

Thi Nga NGUYEN

Élève ingénieure double diplôme
École Supérieure de Génie Civil Hanoï, Hanoï, Vietnam
Master Science des matériaux pour la construction durable (SMCD),
École des Ponts ParisTech

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Holcim Innovation Center

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Gabriel PHAM, Header of durability teams

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Patrick DANGLA, chercheur, université Gustave Eiffel

Résistance au gel/dégel du béton drainant

Mots-clés : béton drainant, résistance au gel/dégel, méthode expérimentale, adjuvants, résistance interfaciale

Contexte

Le béton drainant, du fait de sa forte porosité, permet à l'eau de drainer de la surface vers le sol. Ce matériau innovant permet notamment de réduire les dommages causés par les ruissellements. Cependant, ce béton peut présenter une perte rapide de résistance et de masse, notamment en condition saturée lors de l'exposition à l'attaque gel/dégel. Par conséquence, il est important d'évaluer et d'améliorer de la résistance au gel/dégel du béton drainant.

Missions et objectifs

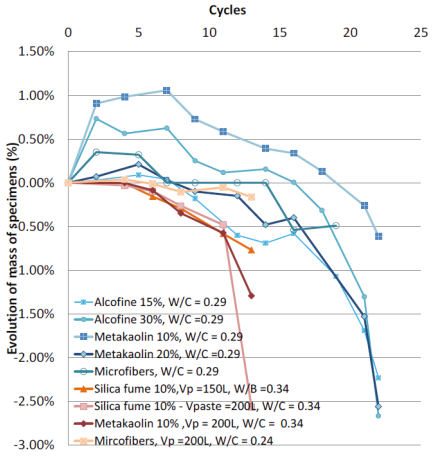
Ce stage vise à étudier la résistance du béton drainant soumis au cycle de gel/dégel avec présence de sel de déglaçage. Une méthode d'essai conforme à la norme allemande, la seule méthode normative actuellement en vigeur, est proposée puis comparée à la méthode de Holcim Innovation Center (HIC). L'efficacité de l'utilisation de différents adjuvants est également étudiée. D'ailleurs, du fait du mode de dégradation du béton drainant, la relation entre la résistance au gel/dégel du béton et celle de l'interface granulat-pâte du ciment est intéressante. Une méthode pour étudier la résistance de l'interface agrégats-pâte au cours des cycles de gel/dégel est donc développée.

Résumé

La norme allemande, ne portant que sur la perte de masse, est comparée à la méthode d'essai développée au HIC, considérant l'évaluation de la masse, du module d'élasticité dynamique et de la résistance mécanique. L'idée est d'étudier les mêmes formulations de béton avec ces deux méthodes d'essai. Le travail expérimental consiste à fabriquer et à caractériser des échantillons de béton drainant, ainsi qu'à conduire des essais en gel/dégel. En particulier, des échantillons sont fabriqués avec des adjuvants prometteurs afin d'améliorer la résistance au gel-dégel. L'efficacité de ces adjuvants, évaluée selon chaque méthode d'essai, est comparée.

Pour la méthode de caractérisation de la résistance entre l'interface du granulat et de la pâte ciment, le travail vise à fabriquer les prismes composés d'une moitié de granulat et d'une moitié de ciment pâte, puis de les exposer aux différents cycles gel/dégel. La résistance de l'interface est évaluée par l'essai flexion 3-points. En plus, les adjuvants qui avaient montré une amélioration de la résistance du béton drainant par essais précédents sont utilisés pour la pâte du ciment.

Le résultat montre l'efficacité des adjuvants sur l'amélioration de la résistance au gel/dégel du béton drainant ainsi que leur impact sur la réaction du béton à l'attaque des différents cycles de gel/dégel. Il y a une corrélation entre la résistance au gel/dégel du béton et la résistance de l'interface entre granulat et la pâte du ciment.



Évolution de masse au cours de cycle gel/dégel par méthode d'essai HIC
© Thi Nga Nguyen, 2021.

Freeze/thaw resistance of pervious concrete

Keywords: pervious concrete, freeze-thaw resistance, experimental method, admixtures, interfacial resistance

Context

Pervious concrete of high porosity allows water to drain from the surface to the ground. This innovative material can reduce the damage caused by runoff, reduce heat island phenomena, etc. However, this concrete can exhibit rapid loss of strength and mass, especially in a saturated condition and upon exposure to freeze/thaw attacks. Therefore, evaluating and improving the freeze/thaw resistance of draining concrete is an important subject.

Missions and goals

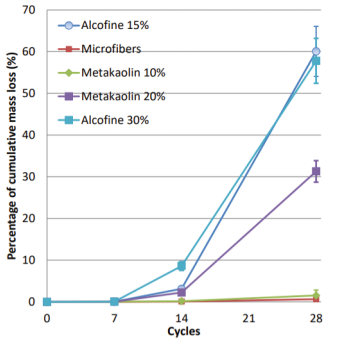
This internship aims to study the resistance of pervious concrete subjected to the freeze/thaw cycle in the presence of de-icing salt. It utilizes a test method conforming to the German standard (the only official standard at present), which is then compared to the method of the Holcim Innovation Center. The efficiency of different adjuvants is also studied. Moreover, due to the degradation mode of pervious concrete, the relationship between the freeze/thaw resistance of concrete and that of the aggregate-paste interface is interesting. Therefore, a method for studying the resistance of the aggregate-paste interface during freeze/thaw cycles is also developed.

Abstract

The German standard (which only measures loss of mass) is compared to the test method developed by the HIC (which contains the evaluation of mass, the dynamic elasticity module, and mechanical strength). The idea is to investigate similar concrete designs with both test methods. The experimental work consists of fabricating and characterizing pervious concrete samples as well as conducting freeze/thaw durability follow-ups. In particular, samples are manufactured with admixtures that promise to improve the freeze-thaw durability of pervious concretes, and the efficiency of the admixtures according to each test method is compared.

The method used to characterize the resistance between the interface of aggregate and cement paste consists of manufacturing prisms composed of one-half cement paste and one-half stone, and then exposing them to different freeze/thaw cycles. The interfacial resistance is evaluated by the 3-point flexural bending test. Moreover, the admixtures that demonstrate an advantage with regard to freeze-thaw resistance according to the internal test are used for the paste mix.

The results show the efficacy of admixtures in improving the freeze/thaw resistance of concrete and their impact on the concrete's reaction to different freeze/thaw attacks. There is a correlation between the freeze/thaw resistance of concrete and the resistance of the interface between the aggregate and the cement paste.



Perte de masse au cours des cycles gel/dégel par méthode normative allemande © Thi Nga Nguyen, 2021.

Maxime PIERRE

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2019

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Université de Tokyo – Concrete Laboratory

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Tetsuya ISHIDA, professeur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Arthur LEBÉE, chercheur, École des Ponts ParisTech

Conception de matériaux cimentaires architecturés par simulation et apprentissage

Mots-clés : matériaux architecturés, matériaux cimentaires, éléments finis, apprentissage par renforcement, corrélation d'images

Contexte

La popularité des méthodes de fabrication additives telles que l'impression 3D s'est étendue au cours des dernières années aux matériaux cimentaires, permettant une liberté de formes importante dans des coûts contrôlés par rapport aux méthodes classiques. Les recherches sur le matériau en lui-même ont également permis de mettre au point des composites cimentaires plus ductiles en traction notamment, les ECC (*Engineered Cementitious Composites*). La combinaison de ces avancées, au niveau du processus de fabrication ainsi que du matériau en lui-même, ouvre des possibilités intéressantes en termes de matériaux cimentaires architecturés.

Missions et objectifs

La conception des matériaux architecturés utilisant des matériaux de base au comportement mécanique complexe est une tâche difficile, et ne saurait être effectué directement. Le but de ce projet de fin d'études était donc de fournir des éléments de conception pour de tels matériaux ainsi que, si possible, un outil d'aide à la conception adaptable, basé sur des simulations, permettant de générer des géométries répondant à des performances mécaniques recherchées.

Résumé

Un outil de simulation adapté aux matériaux cimentaires architecturés bidimensionnels est développé autour d'un code éléments finis spécialisé pour les matériaux cimentaires. Il comprend la génération de géométries pour le motif, le maillage de la géométrie, la simulation en compression et traction ainsi que l'extraction des propriétés mécaniques macroscopiques résultantes.

En utilisant cet outil avec une génération aléatoire des géométries sur un grand nombre de tirages, une étude paramétrique est effectuée sur l'impact des différentes caractéristiques géo-métriques ainsi que des propriétés matériaux sur le comportement macroscopique du matériau architecturé. De cette étude sont dérivées deux classes de géométrie, ductiles et fragiles, dont les comportements sont très différents indépendamment des propriétés intrinsèques du matériau constitutif. Des études plus détaillées sur l'influence des propriétés matériau pour chacune des classes de géométrie donnent des éléments de conception pour les matériaux cimentaires architecturés.

Dans un second temps, un algorithme d'apprentissage par renforcement, dérivé de l'algorithme *Deep Q-Network*, est utilisé afin d'optimiser la géométrie du matériau architecturé dans un certain objectif de performances mécaniques macroscopiques. Des essais expérimentaux sur des éprouvettes coulées dans des moules imprimés en 3D dont les déformations sont suivies par corrélation d'images permettent la validation de l'outil de simulation.

Motif en mortier fibré coulé dans un moule imprimé 3D
© Maxime Pierre, 2021.

Simulation and learning driven design of architected cement-based materials

Keywords: architected materials, cementitious materials, finite elements, reinforcement learning, image correlation

Context

The popularity of additive manufacturing methods such as 3D printing has spread to cementitious materials in the past years, allowing for freedom of shape while retaining reasonable costs when compared to traditional methods. Research on the material itself has also enabled the engineering of traction-ductile cementitious composites, in particular ECCs. Combining these advancements, both from a manufacturing process and a material standpoint, opens up interesting opportunities as far as architected cementitious materials are concerned.

Missions and goals

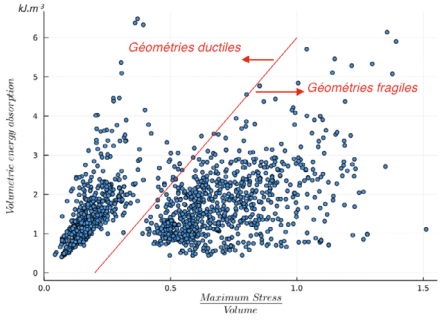
Designing architected materials from base materials with complex mechanical behaviour is no easy task and cannot be achieved by a straightforward approach. The goal of this work was to provide design elements for such materials, and, if possible, a design assistance tool based on a simulation that would generate geometries corresponding to prescribed mechanical performances.

Abstract

A specialized simulation tool for 2D architected cementitious materials is developed based on a finite element code for cemetitious materials. It is comprised of a geometry generator, a meshing tool, a compression/traction test simulator, and an extractor for the resulting macroscopic mechanical properties.

Using this tool with a random geomtry generator in large sample batches, a parametric study on the effect of the different geometrical features as well as material properties on the architected material's macroscopic behavior is conducted. For this study, two classes of geometries are derived – ductile and fragile – the behaviors of which are fundamentally different regardless of the constitutive materials' intrinsic properties. More detailed studies on the influence of material properties on each of these geometry classes give clues as to the design of architected cementitious materials.

Further, a reinforcement learning algorithm – derived from the Deep Q-Network algorithm – is used to optimize the geometry of architected material with specific desired macroscopic mechanical properties. Experimental trials on specimens cast in 3D-printed molds, the deformations of which are tracked through image correlation, validate the simulation framework.



Énergie absorbée en fonction de la contrainte maximale pour 2 000 motifs aléatoires de matériaux architecturés
© Maxime Pierre, 2021.

Éléments de bibliographie

CHEN, Desai, SJOURAS, Mélina, ZHU, Bo *et al.*, 2018. Computational discovery of extremal microstructure families. *Science Advances* [en ligne], janvier 2018, vol. 4, n° 1. DOI: 10.1126/sciadv.aao7005.

MNIH, Volodymyr, KAVUKCUOGLU, Koray, SILVER, David *et al.*, 2013. Playing atari with deep reinforcement learning. *arXiv* [en ligne]. arXiv.1312.5602.

ROSEWITZ, Jessica A., CHOSHALI, Habibeh Ashouri et RAHBAR, Nima, 2019. Bioinspired design of architected cement-polymer composites. *Cement and Concrete Composites* [en ligne], février 2019, vol. 96, pp. 252-265. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.010.

Anthony CHAMAILLE

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Eiffage Infrastructures, Direction des Supports opérationnels (DSO)

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Luc DEFAUCHEUX, ingénieur méthodes confirmé

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Jean-Marc JAEGER, directeur de projets, Setec tpi

Méthodes • *Methods*

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 2 ans - Confidential

Fondation flottante en béton armé post-contraint pour éoliennes en mer

Mots-clés : méthodes, fabrication, industrialisation, béton armé, post-contrainte

Contexte

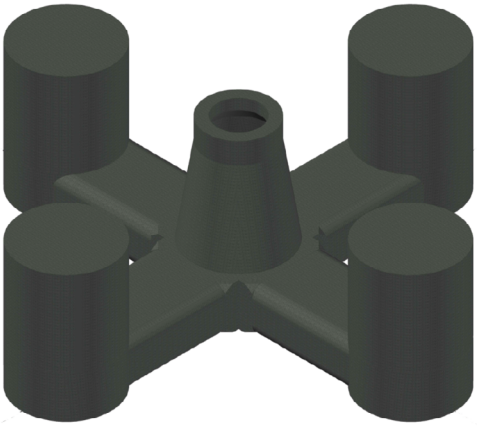
À l'heure où le GIEC publie son sixième rapport et alerte sur les effets néfastes de l'activité humaine sur l'environnement, il est devenu crucial de développer des solutions technologiques écologiques pour produire de l'électricité. L'éolien en mer flottant est devenu, depuis quelques années, porteur d'un réel espoir quant à la production d'électricité verte. Le potentiel de production est quasi-illimité, dans des zones où l'énergie éolienne est abondante et riche. Les industriels du parapétrolier, notamment, se livrent à une véritable course à l'innovation.

Missions et objectifs

Dans le cadre de deux phases de préqualification à des appels d'offres distincts de fermes de 30 et 250 MW en France, nous nous fixons pour objectif de proposer des méthodes innovantes de fabrication de fondations flottantes en béton armé post-contraint pour éoliennes en mer. Nous proposons alors au groupement constitué d'un bureau d'études historique du parapétrolier et de l'entité Eiffage Génie Civil Marine diverses possibilités de fabrication, conception et méthodes d'exécution.

Résumé

Il s'agit ici de concevoir et fabriquer une fondation flottante pour éoliennes en mer de 10 à 15 MW. La fondation étudiée ici et conçue par le bureau d'études, atteint quasiment les 70 m de large par près de 30 m de haut, pour une masse avoisinant les 15 000 tonnes. Nos études ont porté sur le planning de fabrication, les installations de chantiers, les modes de transports de la fondation et la constructibilité d'un tel ouvrage. Elles nous ont notamment amené à industrialiser les méthodes de fabrication de génie civil par l'utilisation d'outils coffrants spécifiques et très performants. Nous avons pu étudier les modes de transports à terre sur *Self-Propelled Modular Transporter*, dits SPMT ou sur "*skid shoes*", une technique notamment utilisée pour le ripage du sarcophage de Tchernobyl. Nous nous sommes intéressé au coût de fabrication. Ces études interviennent tôt dans la conception, ce qui nous a permis d'accompagner le développement de la solution de fondation flottante et de proposer des évolutions de conception. La maîtrise des dispositions constructives et de la fabrication, dès la conception, est primordiale dans un milieu très agressif pour un objet en mouvement sous diverses sollicitations dynamiques. Les conclusions de nos études permettent déjà de donner une feuille de route aux études ultérieures qui préciseront nos analyses. Elles permettent également de démontrer le potentiel certain de développement des éoliennes flottantes dans la production d'électricité verte.



Représentation de la fondation flottante en 3D
© Anthony Chamaillé, 2021.

Post-stressed reinforced concrete floating foundation for offshore wind turbines

Keywords: methods, fabrication, industrialisation, reinforced concrete, post-stressing

Context

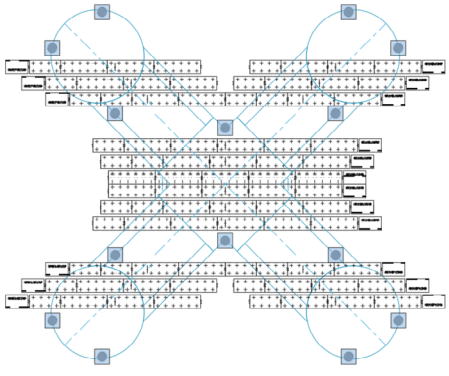
At a time when the IPCC has published its sixth report and warns about the harmful effects of human activity on the environment, it has become crucial to develop environmentally friendly technological solutions to produce electricity. In recent years, floating offshore wind turbines have become a real opportunity for the production of green electricity. The production potential is almost unlimited in areas where wind energy is abundant and rich. The oil and gas industry, in particular, is engaged in a real race for innovation.

Missions and goals

Within the framework of two prequalification phases for separate calls for tenders for 30 and 250 MW farms in France, we set ourselves the objective of proposing innovative methods for the fabrication of floating foundations in post-stressed reinforced concrete for offshore wind turbines. We then propose various fabrication possibilities as well as design and execution methods to the consortium made up of a historical design office of the parapetroleum industry and the entity Eiffage Génie Civil Marine.

Abstract

The aim here is to design and fabricate a floating foundation for 10 to 15 MW offshore wind turbines. The foundation studied here and designed by the engineering office is nearly 70 m wide and 30 m high, with a mass of around 15,000T. Our studies focused on the manufacturing schedule, the construction site facilities, the transport methods for the foundation and the constructability of such a structure. In particular, they led us to industrialise the civil engineering construction methods through the use of specific, high-performance formwork tools. We were able to study the modes of transport on land on a Self-Propelled Modular Transporter, known as SPMT, or on skid shoes, a technology that was used in particular for the shifting of the sarcophagus at Chernobyl. We were also interested in the manufacturing cost. These studies were carried out early in the design process, which enabled us to assist the development of the floating foundation solution and to propose design changes. Oversight over construction provisions and manufacturing from the design stage is essential for an object in motion under various dynamic stresses in a very aggressive environment. The conclusions of our studies already provide a roadmap for further studies that will refine our analyses. They also demonstrate the undoubted development potential of floating wind turbines in the production of green electricity.



Disposition des modules SPMT 48 T/essieu pour le transport de la fondation 15 MW © Anthony Chamaillé, 2021.

Éléments de bibliographie

ADEME, IN NUMERI, ENERDATA, 2020. *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France*. S. L. : ADEME, 100 p.

DET NORSKE VERITAS GERMANISCHER LLOYD, 2018. *Offshore concrete structures*. Standard, DNV-ST-C502, 279 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019. *Offshore Wind Outlook 2019* [en ligne]. Paris : IEA, 98 p. Disponible sur : https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019 (consulté le 22.06.2021).

Agathe CHEVALLIER

Élève ingénieure concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
VINCI Construction Grands Projets

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Fabien COULON, ingénieur études modélisation

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Jérémy BLEYER, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Modélisation aux éléments finis de calculs thermomécaniques sur des réservoirs à gaz naturel liquide (LNG)

Mots-clés : réservoirs LNG, béton armé, plaques multicouches, thermique, éléments finis

Contexte

Les réservoirs à gaz naturel liquide sont des structures composées d'une cuve intérieure renfermant le gaz et d'une enceinte extérieure, le plus souvent en béton armé et précontraint. Lors d'une fuite de gaz, le gaz liquide, qui est à une température très basse, entre en contact avec l'enceinte en béton. Des calculs thermomécaniques permettent alors d'assurer que la structure demeure étanche afin d'éviter des épanchements de gaz vers l'extérieur.

Missions et objectifs

L'étude consiste à développer un modèle aux éléments finis en trois dimensions afin de représenter l'impact d'une fuite de gaz localisée sur une structure de réservoir à gaz. Le couplage thermo-mécanique doit être pris en compte, car la température très basse du gaz modifie les caractéristiques mécaniques du béton.

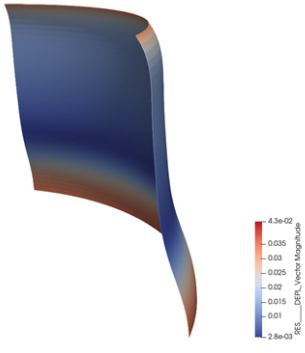
Résumé

Plusieurs types de fuite de gaz peuvent survenir dans un réservoir à gaz naturel liquide (LNG). Dans le cas d'une ouverture de la cuve sur toute sa hauteur, on assiste à un épanchement de grande envergure, et l'enceinte en béton se retrouve remplie de gaz de manière homogène jusqu'à une certaine hauteur. Ces situations peuvent être représentées avec des modèles axisymétriques. Cependant, d'autres fuites sont dues à une rupture plus locale de la cuve, et dans ce cas seule une partie limitée de l'enceinte en béton se retrouve en contact avec du gaz. Ces situations nécessitent une modélisation en trois dimensions. L'objectif est donc de développer un modèle en trois dimensions de réservoir, prenant en compte la variation des caractéristiques des matériaux en fonction de la température.

Les éléments coques « classiques » ne permettant pas d'appliquer de gradient thermique non linéaire dans l'épaisseur du voile du réservoir, ce modèle est réalisé à l'aide d'éléments coques multicouches sur le logiciel Code Aster.

La dépendance du comportement des matériaux en fonction de la température ainsi que les lois de comportement sont validées grâce à des modèles simplifiés. Une attention particulière est portée aux phénomènes de fissuration et plastification.

Les résultats obtenus avec ce modèle 3D sur une géométrie axisymétrique sont validés par des modèles axisymétriques existants.



Déformée d'un voile de réservoir soumis à un gradient thermique dans l'épaisseur © Agathe Chevallier, 2021.

Finite element modeling of thermomechanical calculations on Liquid natural gas tanks (LNG)

Keywords: LNG storage tanks, reinforced concrete, multilayer plates, thermics, finite element

Context

Liquid natural gas tanks are structures composed of an inner tank containing the gas, and an outer enclosure, most often made of reinforced and prestressed concrete. During a gas leak, the liquid gas, which is at a very low temperature, comes into contact with the concrete enclosure. Thermomechanical calculations ensure that the structure remains tight to avoid gas spills to the outside.

Missions and goals

The study consists in developing a three-dimensional finite element model to represent the impact of a localized gas leak on a gas tank structure. Thermomechanical coupling must be taken into account because the very low temperature of the gas modifies the mechanical characteristics of the concrete.

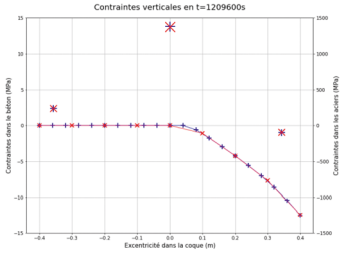
Abstract

Several types of gas leaks can occur in a liquid natural gas (LNG) tank. In the case of a full-height tank opening, a large-scale spill occurs, and the concrete enclosure is filled homogeneously with gas up to a certain height. These situations can be represented with axisymmetric models. However, other leaks are due to a more local rupture of the steel tank, and in this case only a limited part of the concrete outer wall is in contact with gas. These situations require three-dimensional modeling. The objective is therefore to develop a three-dimensional model of the tank, taking into account the variation of material characteristics as a function of temperature.

"Typical" shell elements do not allow the application of a non-linear thermal gradient in the thickness of the tank outer wall, so this model is carried out using multilayer shell elements on the Code Aster software.

The temperature dependence of the material behavior as well as the behavior laws are validated with simplified models. Particular attention is paid to the phenomena of cracking and plastification.

The results obtained with this 3D model on an axisymmetric geometry are validated by existing axisymmetric models.



Comparaison des contraintes obtenues avec les modèles 3D et axisymétrique © Agathe Chevallier, 2021.

Éléments de bibliographie

HRYNYK, Trevor et VECCHIO, Frank, 2015. Capturing Out-of-Plane Shear Failures in the Analysis of Reinforced Concrete Shells. *Journal of Structural Engineering* [en ligne], décembre 2015, vol. 141, n° 12. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001311.

NAYROLES, Bernard, 2009. *Théorie des plaques, déplacement complémentaire et plaques stratifiées*. Marseille : CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 87 p.

TIMOSCHENKO, Stephen et WOINOWSKY-KRIEGER, Sergius, 1959. *Theory of plates and shells*. New York : McGraw-Hill Book Company, 580 p.

Odran HAQUETTE

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Terrell

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Clément FRECENON, ingénieur structure

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Aymeric PERRET DU CRAY, enseignant, École des Ponts ParisTech

Modélisation numérique des actions de vent et optimisation des formes architecturales

Mots-clés : vent, tour, forme, optimisation, CFD

Contexte

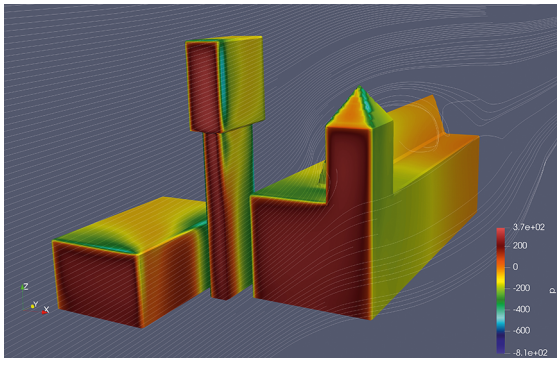
La prise en compte des effets du vent est une donnée inévitable pour un projet de génie civil. Cependant certains projets sont plus impactés que d'autres. Par exemple les tours de grande hauteur subissent de manière régulière les actions irrégulières du vent et ces efforts peuvent devenir prépondérants pour la conception des éléments structurels. Un travail d'études sur l'impact du vent est souvent nécessaire.

Missions et objectifs

Il est possible d'agir au cours de l'ensemble de la conception pour optimiser et réduire la charge de vent sur les bâtiments. Une littérature existe et propose des solutions. Un premier objectif de ce projet de fin d'études (PFE) est de comprendre les effets qui rendent le vent si préjudiciable pour la construction de tours de grande hauteur. Le second est d'identifier des formes architecturales ou des solutions structurelles qui permettent de réduire son impact.

Résumé

Ce PFE a permis de créer une méthode pour prendre en compte le plus en amont possible l'impact du vent sur une structure de grande hauteur. Un outil de calcul numérique d'écoulement a été développé dans ce but. Cette approche doit être interdisciplinaire et donc prendre en compte à la fois les méthodes géométriques et structurelles pour réduire les efforts de vent. L'outil construit s'appuie sur un code *open-source* de mécanique des fluides et un logiciel de dessin pour donner des premiers résultats concernant les efforts de vent sur une géométrie donnée pour en saisir les points forts et les faiblesses et étudier les modifications profitables. Il a été nécessaire de comprendre les spécificités de la modélisation des écoulements de vent et de choisir la meilleure méthode et les meilleurs paramètres pour obtenir des résultats fiables efficacement. Les différents phénomènes de vent, que ce soit les charges statiques ou les réactions, telles que le détachement tourbillonnaire, sont appréhendés. Cet outil a été mis en application dans différentes situations afin de s'assurer, d'une part, de sa cohérence, et d'autre part, de ses limites et aussi pour l'adapter au mieux au travail d'ingénieur-concepteur structure dans un bureau d'études. Enfin un travail complémentaire sur l'influence des formes des bâtiments sur les efforts de vent a été mené et confronté à des résultats dans la littérature.



Étude d'un écoulement sur un bâtiment
© Odran Haquette, 2021.

Numerical modeling of wind actions and optimization of architectural forms

Keywords: wind, high-tower, form, optimization, CFD

Context

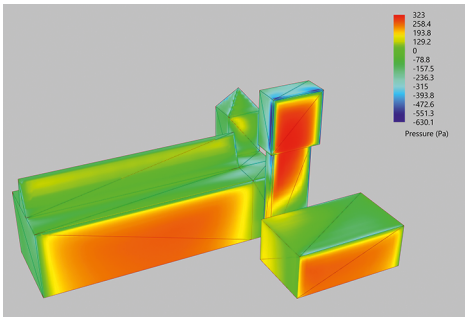
The effects of wind must be taken into account in all civil engineering projects. However, some projects are more affected than others. For example, high-rise buildings are regularly subjected to irregular wind actions and these forces can become preponderant for the design of structural elements. A study on the impact of wind is often necessary.

Missions and goals

It is possible to act during the whole design process to optimize and reduce the wind load on buildings. A literature exists and proposes solutions. A first objective of this PFE is to understand the effects that make wind so detrimental for the construction of high-rise buildings. The second is to identify architectural forms or structural solutions that reduce wind impact.

Abstract

This PFE has created a method to take into account the impact of wind on a high structure as early as possible. A numerical flow calculation tool has been developed for this purpose. This approach must be interdisciplinary and therefore take into account both geometrical and structural methods to reduce wind forces. The tool built relies on an Open-source code of fluid mechanics and a drawing software to give first results concerning wind forces on a given geometry to understand strengths and weaknesses and study profitable modifications. It was necessary to understand the specificities of wind flow modeling and to choose the best method and parameters to efficiently obtain reliable results. Different wind phenomena, whether concerned with static loads or reactions, such as vortex shedding, needed to be understood. The tool has been applied in different situations in order to test its coherence and its limits, and also to adapt it to the work of a structural engineer in a design office. Finally, a complementary study on the influence of building shapes on wind forces has been carried out and compared to results in the literature.



Cartographie des pressions exercées par le vent
© Odran Haquette, 2021.

Éléments de bibliographie

IRWIN, Peter, 2009. Wind engineering challenges of the new generation of super-tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [en ligne], septembre-octobre 2009, vol. 97, pp. 328-334. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.05.001.

MENG, Fan-Qin, HE, Bao-Jie, ZHU, Jin *et al.*, 2018. Sensitivity analysis of wind pressure coefficients on Caarc standard tall buildings in Cfd simulations. *Journal of Building Engineering*, mars 2018, vol. 16, pp. 146-158. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.01.004.

XIE, Jiming, 2012. Aerodynamic optimization in super-tall building designs. *In* : International Association for Wind Engineering. *The Seventh International Colloquium On Bluff Body Aerodynamics and its Application (BBAA7)* [en ligne], 2-6 septembre 2012, Shanghai. Disponible sur : http://www.iawe.org/Proceedings/BBAA7/J.Xie.pdf (consulté le 18/02/2021).

Joseph MANSOUR

Élève ingénieur double diplôme
École Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth, Mansourieh, Liban

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
VINCI Construction France ISC

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Laura BEUCAN, chef de projet

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Jean-Marc JAEGER, Directeur de projets, Setec tpi

Optimisation du calcul des planchers prédalles

Mots-clés : prédalle, dalle de compression, modélisation, éléments finis, *sofistik*

Contexte

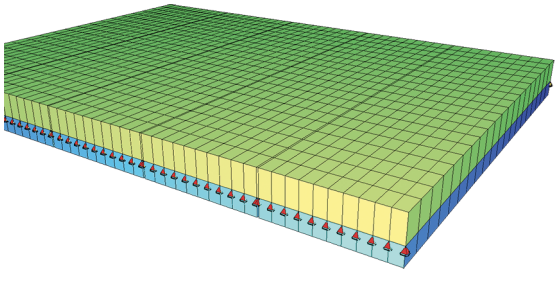
Le bureau d'études ISC de VINCI Construction étudie un nombre d'ouvrage de génie civil très varié en phase exécution. Dans ce cadre, la réalisation d'éléments préfabriqués est souvent choisie par les chantiers. Dans cette situation les études se trouvent complexifiées et le temps d'étude démultiplié. Les calculs sont réalisés en général manuellement et certaines vérifications sont parfois laborieuses en particulier quand le volume d'éléments à étudier est important.

Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études (PFE) est de réaliser un modèle par éléments finis pour le calcul d'un plancher prédalle. Ce modèle a pour objectif principal d'automatiser le calcul de ces types de plancher et ainsi optimiser leur dimensionnement.

Résumé

Les planchers prédalles présentent divers avantages par rapport aux autres types de plancher. Cependant, leur principe de calcul est basé sur des phénomènes complexes, et le phasage de construction y interfère aussi. Plusieurs logiciels de modélisation par éléments finis sont présents sur le marché, mais pour ce projet le logiciel Sofistik a été choisi après avoir analysé ses avantages par rapport aux autres. Toutes les hypothèses et les principes théoriques liés à la modélisation ont été étudiés et détaillés, concernant toutes les particularités et le phasage de construction que présentent les planchers prédalles. Le modèle peut prendre en entrée la majorité des paramètres concernés, liés aux matériaux, à la géométrie et les dimensions, ainsi que les conditions d'appui. Le cas d'un plancher hyperstatique est également possible. L'étude concerne à la fois la phase de service et la phase de construction, avec la présence d'étaiement dans cette dernière si nécessaire. Les planchers prédalles présentent des particularités pour le fluage et le retrait, dues à la différence d'âge du béton entre les prédalles et la dalle de compression coulée sur place. Ces particularités sont bien étudiées et considérées dans le modèle. Finalement, les calculs consistent à déterminer le ferraillage des éléments de ces planchers, que ce soit le ferraillage des zones courantes ou des zones particulières, selon l'état limite ultime (ELU) de l'Eurocode 2 lié aux structures en béton armé. Des vérifications à l'état limite de service (ELS) sont également menées, pour vérifier l'ouverture des fissures et les limites des contraintes dans les matériaux. Une sortie complète avec tous les résultats nécessaires est disponible pour l'utilisateur.



Modèle éléments finis d'un plancher prédalle
© Joseph Mansour, 2021.

Optimization of the calculation of precast floors

Keywords: precast floor panels, compression slab, modelling, finite element analysis, sofistik

Context

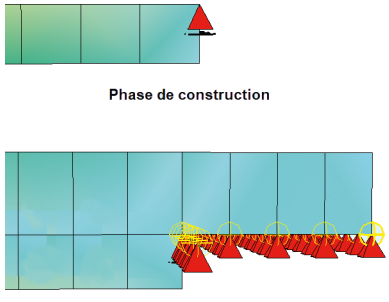
The ISC structural design office of VINCI Construction studies a number of varied civil engineering structures in the execution phase. In this context, construction cites often choose to work with prefabricated elements, which render the studies more complex and multiply the study duration. Calculations are generally carried out manually and certain verifications are sometimes laborious, in particular when the volume of elements to be studied is significant.

Missions and goals

The purpose of this project is to provide detailed explanations for the realization of a finite element model to calculate precast floor panels. The main objective of this model is to automate the calculation of these types of floors and thus optimize their dimensioning.

Abstract

Precast floors have various advantages over other types of floors. However, their calculation principle is based on complex phenomena, and the construction phasing also interferes. Several finite element modeling software solutions are available on the market, but for this project, Sofistik was chosen after analyzing its advantages over other software. All hypotheses and theoretical principles related to modelling were studied as far as they concerned the particularities and the construction phasing necessitated by precast floors. As input, the model can use the majority of relevant parameters related to materials, geometry, and dimensions, as well as support conditions. The case of a statically indeterminate floor is also possible. The study concerns both the service phase and the construction phase, with the presence of bracing in the latter if necessary. Precast floors present particular issues of creep and shrinkage, which are due to the age difference between the concrete used for the precast slabs and the cast-in-place compression slab. The developed model takes these particularities into account. Finally, the necessary calculations consist in determining the reinforcement of the elements of these floors, whether they pertain to common zones or particular zones, according to the ultimate limit state of Eurocode 2 related to reinforced concrete structures. Verifications at the serviceability limit state (SLS) are also carried out to check the occurrence of cracks and the limits of stresses in the materials. A complete output with all necessary results is available to the user.



Phasage de construction au niveau des appuis
© Joseph Mansour, 2021.

Éléments de bibliographie

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB) et COMMISSION CHARGÉE DE FORMULER DES AVIS TECHNIQUES (CCFAT), 2016. Dalles pleines confectionnées à partir de prédalles préfabriquées et de béton coulés en œuvre. Cahier des Prescriptions Techniques communes. *e-Cahier du CSTB*, avril 2016, n° 2892, 146 p.

PARMENTIER, B., POLLET, V. et ZARMATI, G., 2009. Le retrait empêché du béton. Prédiction selon l'Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d'exécution. *Les Dossiers du CSTC*, n° 2, cahier n° 3, 12 p.

TROST, Heinrich, 1991. Creep, relaxation and shrinkage of structural concrete. *IABSE Reports – Rapports AIPC – IVBH Reports* [en ligne], vol. 62 IABSE Colloquium Stuttgart 1991. Structural Concrete, pp. 59-76. DOI: 10.5169/seals-47621.

Julie RODET

Formation complémentaire intégrée pour les normaliens civils
Double diplôme ENS de Lyon, École des Ponts ParisTech

Promotion 2019

Mission en entreprise réalisée à :
MENARD, VINCI Construction

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Stéphane BRULE, directeur d'agence régionale, Auvergne Rhône-Alpes

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Fahd CUIRA, responsable de module, École des Ponts ParisTech

Étude d'interaction sol-bâtiment sous sollicitation sismique

Mots-clés : interactions, bâtiments, vibrations, mesures, modélisation

Contexte

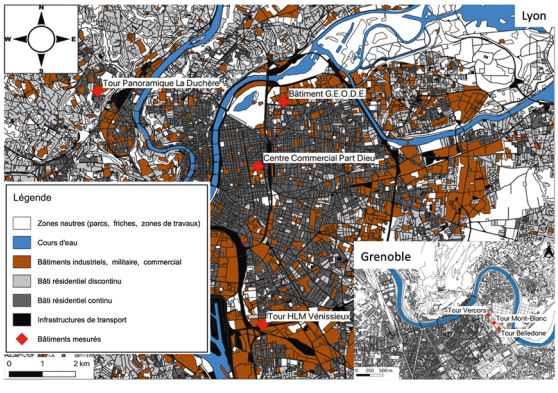
La propagation des ondes sismiques induit du balancement au niveau des bâtiments ainsi que des efforts internes au droit des fondations (Pecker, 1986 ; Belmouden, Lestuzzi, 2006). Soumis à des forces d'inertie, les bâtiments tentent de préserver leur équilibre en transmettant des efforts à leur sol support. Le couplage du système de fondation des bâtiments avec le terrain est ainsi à l'origine de l'interaction sol – structure inertielle (ISS) dans le cadre de laquelle la structure devient elle-même une source d'oscillations dynamiques.

Missions et objectifs

En adoptant une approche semi-analytique, cette étude cherche à optimiser la modélisation du comportement dynamique de bâtiments existants dans l'optique de qualifier l'état de santé structural et la vulnérabilité du bâti urbain. Pour modéliser le bâti existant de manière réaliste, l'objectif principal de l'étude est d'identifier les modes de vibration en flexion d'ouvrages urbains et d'essayer de les faire converger vers des valeurs mesurées en ajoutant de l'ISS à la base des structures.

Résumé

L'actuel contexte économique et environnemental exigeant nécessite une meilleure gestion du parc immobilier existant et une anticipation des dégradations de la résistance des structures. Cependant, les caractères dynamique, cyclique et non linéaire du comportement des structures sous sollicitation sismique le rendent particulièrement complexe à étudier. Les fréquences prédites par les modèles avec ISS sont parfois sensiblement différentes des modes de vibration mesurés, surtout pour des bâtiments relativement peu haut d'une vingtaine de mètres. En revanche, la prise en compte des effets d'ISS permet d'approcher à 0,01 Hz près la fondamentale de tours d'environ 100 mètres de haut sur sol mou. La prise en compte des effets d'ISS semble donc particulièrement importante pour de hauts bâtiments susceptibles d'être sujets à de grandes déformations, comme les tours. Sur sol raide, la fréquence du premier mode prédite par le modèle à base fixe de l'Eurocode 8 converge vers la valeur mesurée, traduisant ainsi l'absence d'effets d'ISS significatifs. Pour certains bâtiments, les différences pointées entre la fréquence fondamentale prédite et mesurée suggèrent l'intervention d'autres facteurs, tels que le vieillissement structural, sur leur signature spectrale. L'interprétation physique du jeu de ces facteurs est actuellement difficile du fait de l'absence de mesure de référence, ne permettant pas de conclure quant à l'assouplissement ou au raidissement des structures. Toutefois, la confrontation de résultats numériques et de données expérimentales comme celle effectuée dans cette étude pourrait permettre d'optimiser la modélisation et de pérenniser l'exploitation du bâti existant.



Carte illustrant les différentes typologies de bâti urbain établies dans Lyon ainsi que les bâtiments mesurés dans le cadre de l'étude.
© Julie Rodet, 2021.

Study of the effects of soil-structure interaction (ISS) under seismic stress

Keywords: interaction, buildings, modelling, measures, vibrations

Context

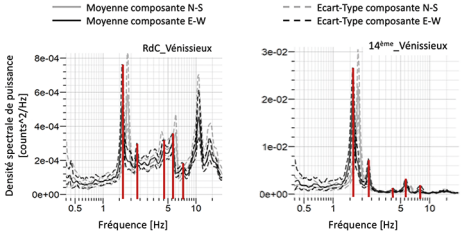
The propagation of seismic waves induces swaying at the building level as well as internal forces at the foundation level (Pecker, 1986; Belmouden, Lestuzzi, 2006). Subjected to inertial forces, buildings try to preserve their balance by transmitting forces to their supporting soil. The coupling of the foundation system of the buildings with the ground is thus at the origin of the interaction ground – inertial structure (ISS) within the framework of which the structure becomes itself a source of dynamic oscillations.

Missions and goals

By adopting a semi-analytical approach, this study seeks to optimize the modeling of the dynamic behavior of existing buildings with a view to qualifying the state of structural health and the vulnerability of urban buildings. To model the existing building in a realistic way, the main objective of the study is to identify the modes of vibration in the bending of urban structures and to try to make them converge towards measured values by adding ISS at the base of the structures.

Abstract

The current demanding economic and environmental context requires better management of the existing building stock and anticipation of deterioration in the resistance of structures. However, the dynamic, cyclic, and non-linear characteristics of the behavior of structures under seismic stress make this behavior particularly complex to study. The frequencies predicted by the models with ISS are sometimes significantly different from the measured vibration modes, especially for relatively low buildings of around twenty meters. On the other hand, taking into account the effects of ISS makes it possible to approach the fundamental of towers about 100 meters high on soft ground to within 0,01 Hz. Taking into account the effects of ISS therefore seems particularly important for tall buildings likely to be subject to large deformations, such as towers. On stiff ground, the frequency of the first mode predicted by the fixed base model of Eurocode 8 converges towards the measured value, thus reflecting the absence of significant ISS effects. For some buildings, the differences noted between the predicted and measured fundamental frequency suggest the intervention of other factors, such as structural aging, on their spectral signature. The physical interpretation of the interplay of these factors is currently difficult due to the absence of reference measurement, which does not allow conclusions to be drawn as to the softening or stiffening of the structures. However, the confrontation of numerical results and experimental data such as that carried out in this study could make it possible to optimize the modeling and to perpetuate the exploitation of the existing building.



Spectres correspondant à la réponse dynamique de la tour HLM de Vénissieux, obtenus à partir de mesures de bruit de fond conventionnelles (Bard *et al.*, 2008) réalisées à l'aide d'un capteur trois composantes Lennartz. Le traitement des données a été effectué avec le logiciel libre GEOPSY (Wathelet *et al.*, 2020). © Julie Rodet, 2022.

Éléments de bibliographie

BRÛLÉ Stéphane et CUIRA Fadh, 2018. *Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme. Application aux fondations et aux soutènements*. La Plaine Saint-Denis : AFNOR éditions, 226 p.

FARSI, Mohammed N. et BARD, Pierre-Yves, 2004. Estimation des périodes propres de bâtiments et vulnérabilité du bâti existant dans l'agglomération de Grenoble. *Revue française de génie civil*, vol. 8, n° 2-3, pp. 149-179.

MIKAEL, Ali, 2011. *Évaluation des paramètres physiques des bâtiments : amortissement, fréquence et modes de comportement des structures de génie civil. Approche expérimentale*. Thèse de doctorat : Sciences de la terre, de l'univers et de l'environnement. Grenoble : université de Grenoble.

Christel SEMAAN

Élève ingénieure double diplôme
École Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth, Liban

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Dodin Campenon-Bernard

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Anthony SCARAMOZZINO, directeur du bureau d'études structures

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Jean-Marc JAEGER, directeur de projets, Stec tpi

École des Ponts ParisTech

Modélisation paramétrique et optimisation de ponts construits par encorbellements

Mots-clés : optimisation, paramétrique, ponts, encorbellement

Contexte

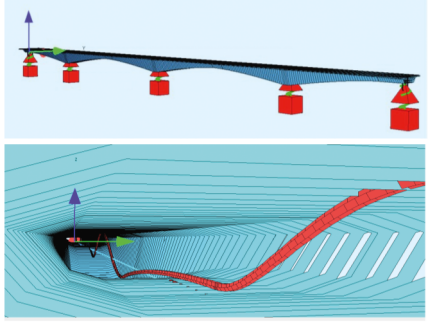
L'entreprise est spécialisée en ouvrages d'art, et répond aux appels d'offres en continu. Il a été intéressant de développer un outil qui automatise le processus de calcul de prédimensionnement.

Missions et objectifs

Par le biais de développements dans Python et Sofistik dans Grasshopper, l'objectif est la réalisation d'un modèle dont la géométrie est modifiable rapidement tout en adaptant les câbles de précontrainte et les éléments rattachés aux sections de base. Ceci permettra d'aller plus vite et d'itérer davantage sur une structure en phase d'avant-projet. Une analyse du bilan carbone a été réalisée dans le but de comparer l'équivalent carbone épargné par de simples choix mais qui nécessitent tout de même de l'étude et des modifications.

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur la modélisation paramétrique d'un pont construit en encorbellements successifs. Le tablier est composé d'un monocaisson en béton précontraint. La réalisation de ce modèle se fait sur trois niveaux : le préprocesseur, le processeur et le postprocesseur. Le premier concerne la géométrie, les propriétés des sections et des matériaux ainsi que les chargements et le phasage. Le processeur engendre les calculs des cas de charge considérés ainsi que les combinaisons aux états limites. Le postprocesseur consiste en l'analyse des résultats et prise de décision. Les décisions peuvent concerner des variables comme la géométrie, les propriétés mécaniques ainsi que les éléments stabilisants dont la précontrainte. L'optimisation peut être effectuée au niveau du post-traitement, lors du choix des variables à adapter et de l'ordre dans lequel ceci est fait. Une étude de sensibilité de la contrainte aux variables est effectuée afin de prioriser des grandeurs sur d'autres. Dans cette étude, l'optimisation se fera sur la contrainte de traction en fibre supérieure du hourdis supérieur du voussoir sur pile. La hauteur totale du voussoir sur pile s'est avérée avantageuse, ainsi que la précontrainte de fléau. La position de la précontrainte de continuité par rapport à la fibre neutre de la section serait plus avantageuse que le nombre de câbles, vu sa longueur et la quantité de pertes instantanées et différées qui peuvent en découler. Toutefois, il s'est avéré que plus le béton est de haute performance, plus son empreinte en carbone augmente. La finalité de cette optimisation n'est pas uniquement économique, mais également environnementale et écologique. Les questions naturelles se posent et s'imposent de plus en plus, la construction étant l'une des sources de pollution.



Représentation 3D de l'ouvrage paramétrique étudié
© Christel Semaan, 2021.

Modeling and optimization of a balanced cantiliver bridge

Keywords: optimization, parametric, bridge, calanced cantilever

Context

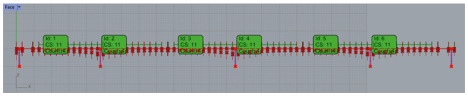
The company is specialized in works of art and constantly responds to new studies. It was interested in developing a tool that automates the predetermination of sections and calculation processes.

Missions and goals

Through developments in Python and Sofistik in Grasshopper, the aim was to create a model whose geometry could be quickly modified while adapting to the prestressed cables and the elements attached to the base sections. This model will make it possible to go faster and to iterate more on a structure in pre-project phases. A carbon footprint analysis was carried out in order to compare the carbon equivalent saved by choices that are simple but nonetheless require study and modifications.

Abstract

This end-of-studies project focuses on the parametric modeling of a bridge built in successive cantilevers. The deck is made up of a prestressed concrete single-chamber. The realization of this model was done on three levels: that of pre-processing, processing and post-processing. The first concerns the geometry, the properties of the sections and the materials, as well as the loads and the phasing. The processing level generates the calculations of the load cases considered as well as the combinations of limit states. Finally, the post-processing level involves analyzing the results and making decisions. The decisions can relate to variables such as geometry, mechanical properties, and stabilizing elements including prestressing. Optimization can be carried out at the post-processing level, when choosing which variables to adapt and in which order. A study of the sensitivity of the constraint to variables is carried out in order to prioritize certain quantities over others. In this study, the optimization is performed on the upper fiber tensile stress of the upper slab of the pier segment. The total height of the segment on the pier proved to be advantageous, as did the beam preload. The position of the continuity prestress with respect to the neutral fiber of the section would be more relevant than the number of cables, given its length and the quantity of instantaneous and delayed losses that can result from it. However, it has also been found that the higher the performance of the concrete, the more markedly its carbon emission falls. The purpose of this optimization is not only economic, but above all environmental and ecological. Construction being a source of pollution, questions about the environment arise with increasing frequency and need to be addressed.



Modèle avant export et interpolation des sections
© Christel Semaan, 2021.

Éléments de bibliographie

COLLECTIF, 2003. *Ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs : guide de conception*. Bagneux : SETRA, 271 p.

VIRLOGEUX, Michel, 2020. *Cours de conception et construction des ponts*. ENPC.

Lucie VINCENT

Élève ingénieure concours commun

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Artelia

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Lucas MARCHESE, responsable du pôle structures complexes et innovantes

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Jesus PEREZ HERREROS, enseignant, Terrasol

École des Ponts ParisTech

Études paramétriques pour optimisation des méthodes de dimensionnement des soutènements

Mots-clés : soutènement, coefficient de réaction, effet de voûte, modélisations, paramètres

Contexte

Depuis quelques années, on assiste à la conception et à la construction de nombreuses nouvelles lignes de métro souterraines, en France comme à l'étranger, avec notamment la construction du Grand Paris Express et d'autres lignes telles que le Toulouse Aerospace Express. Il en résulte une utilisation accrue des méthodes de dimensionnement pour les structures de soutènement permettant de construire les gares souterraines.

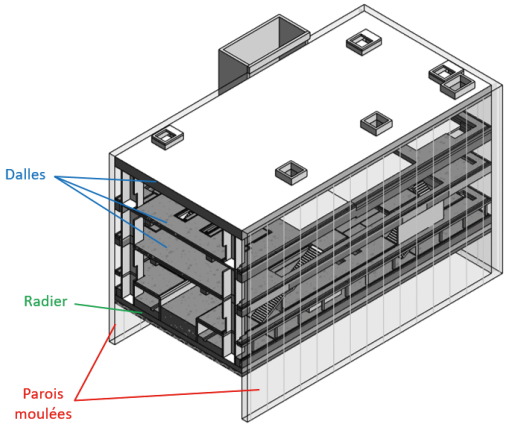
Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études est l'étude de ces méthodes de dimensionnement, et en particulier la plus utilisée qui est la méthode aux coefficients de réaction. La première mission est donc de comprendre les hypothèses sur lesquelles repose cette méthode et comment elle est utilisée en bureau d'études. Il s'agit ensuite de soulever certains problèmes et limites de cette méthode, puis de les étudier à l'aide d'études paramétriques et de comparaisons avec d'autres méthodes comme celle aux éléments finis.

Résumé

La méthode aux coefficients de réaction repose sur l'hypothèse fondamentale de la modélisation d'un massif de sol semi-infini par un ensemble de ressorts horizontaux et indépendants, dont la partie élastique est caractérisée par le coefficient de réaction. On s'interrogera dans un premier temps sur le choix de ce coefficient de réaction et ses limites d'application. Ensuite, on questionnera l'hypothèse des ressorts indépendants et on présentera le phénomène d'effet de voûte dans le sol. On étudiera son influence sur les résultats et les paramètres favorisant son apparition. On s'interrogera également sur l'hypothèse du massif de sol semi-infini dans le cas d'une fouille étroite et on étudiera le calcul de la butée dans cette situation.

Après les problématiques concernant la modélisation du sol, on s'intéressera aux structures en béton des gares souterraines, modélisées sans prise en compte des phénomènes de fluage et de retrait. Dans la dernière partie, on s'attachera à étudier l'influence de ces deux phénomènes sur les résultats.



Vue 3D d'une gare souterraine type
© Lucie Vincent, 2021.

Parametric studies for optimization of the dimensioning methods of retaining structures

Keywords: retaining structures, reaction coefficient, vault effect, models, parameters

Context

In recent years, many new underground metro lines have been designed and built in France and abroad, including the "Grand Paris Express" and other lines such as the "Toulouse Aerospace Express". This has resulted in an increased use of dimensioning methods for the retaining structures of underground stations.

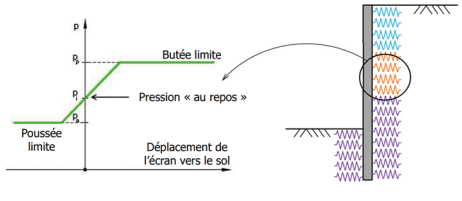
Missions and goals

The objective of this final year project is to study these dimensioning methods, and in particular the most frequently used one, which is the reaction coefficient method. The first mission is to understand the hypotheses on which this method is based and how it is used in engineering offices. The second mission is to address certain problems and limits of this method, then to analyze them using parametric studies and comparisons with other methods such as the finite element method.

Abstract

The reaction coefficient method is based on the fundamental hypothesis of modeling a semi-infinite soil mass by a set of horizontal and independent springs, whose elastic part is characterized by the reaction coefficient. We will first question the choice of this reaction coefficient and its limits of application. Then, we will question the hypothesis of independent springs and present the phenomenon of the arch effect in the ground. We will study its influence on the results as well as the parameters favoring its appearance. We will also question the hypothesis of the semi-infinite soil mass in the case of a narrow excavation and study the calculation of the passive earth pressure under such circumstances.

After the problems concerning the modeling of the soil, we will focus on the concrete structures of underground stations, modeled without taking into account the phenomena of creep and shrinkage. In the last part, we will study the influence of these two phenomena on the results.



Principe de la méthode aux coefficients de réaction
© Lucie Vincent, 2021.

Éléments de bibliographie

AFNOR, 2009. *Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènements – Écrans*. NF P 94-282. Paris : AFNOR, 176 p.

CEREMA, 2016. *Eurocode 7 – Application aux écrans de soutènement*. NF P94-282. Provins : Cerema, 76 p.

NEJJAR, Khadija, 2019. *Comportement des parois de soutènement dans un contexte exceptionnel (grande profondeur, formations déformables, environnement sensible). Application à la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart du Grand Paris Express et comparaison avec les mesures réalisées sur site*. Thèse de doctorat : Matériaux, Mécanique, Génie civil, Électrochimie. Saint-Martin-d'Hères : université Grenoble Alpes.

Flavien CHAPUIS

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Office fédéral de l'énergie, Confédération suisse

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Markus SCHWAGER, chef suppléant de la section Surveillance des barrages

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Christian CREMONA, directeur Pôle Ingénierie Matériaux, Bouygues Travaux publics

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Obstruction par bois flottants des évacuateurs de crue des barrages de la Suisse

Mots-clés : obstruction par bois flottants, évacuateurs de crues de barrages, données SIG, méthodes statistiques

Contexte

L'obstruction par des bois flottants des évacuateurs de crue de barrages est un phénomène documenté depuis plusieurs décennies. Ainsi, en 1978, le barrage de Palagnedra (Suisse) subit lors d'une crue centennale une obstruction complète de son déversoir. Le débordement incontrôlé consécutif manqua de mener à la ruine de l'ouvrage. Malgré le risque que les bois flottants font courir aux évacuateurs de crues et aux barrages, cette problématique constitue un sujet traité à la marge par les réglementations nationales.

Missions et objectifs

L'Office fédéral suisse de l'énergie (OFEN), en tant qu'autorité régulatrice chargée de contrôler la bonne sécurité des barrages, souhaitait d'une part établir une classification des barrages permettant d'en connaître les plus sensibles vis-à-vis du risque d'obstruction. D'autre part, il s'agissait de développer de nouvelles approches pour définir de nouveaux critères, et ainsi, procéder à un *aggiornamento* des directives relatives à la sécurité aux crues.

Résumé

Le travail a illustré l'utilisation des systèmes d'information géographiques (SIG) suisses afin d'extraire des géodonnées caractérisant les propriétés des forêts situées dans les bassins versants des barrages suisses. Elles concernent aussi bien la géométrie des organes d'évacuation que la végétation présente.

Il s'agissait ensuite de mettre en œuvre des méthodes statistiques pour analyser les données obtenues. La base de données a été réduite à l'aide de différents outils de la statistique (matrice des corrélations, analyse en composantes principale). La taille restreinte de la population étudiée a constitué une contrainte majeure dans le choix et l'implémentation de modèles statistiques prédictifs. Il a été en effet nécessaire de trouver des compromis (*trade-offs*) entre le nombre de variables explicatives, lesquelles reflètent le degré de complexité du problème, et la nécessité pour les algorithmes de converger vers une solution stable, fiable, cohérente et aussi interprétable que possible. L'étude propose trois évaluations statistiques différentes de la probabilité d'obstruction de l'évacuateur par des bois flottants, pour chaque barrage, en faisant usage d'une classification hiérarchique, d'un arbre de décision et d'une régression logistique. Ces trois approches donnent des estimations légèrement différentes du risque de formation d'embâcles, mais la combinaison conjointe des trois techniques diminue par construction leurs incertitudes respectives, et constitue dès lors un outil applicable pour obtenir une hiérarchisation des évacuateurs de crues des barrages suisses, selon leur vulnérabilité au risque d'obstruction par des bois flottants.

Barrage de Palagnedra (Suisse) : déversoir modifié et piliers de pont arasés après obstruction par des bois flottants lors de la crue d'août 1978
© Swissair Photo AG 1983, CC-BY-SA 4.0 (source : ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv/Stiftung Luftbild Schweiz).

Blockage of Swiss dam spillways by floating woods

Keywords: clogging by floating woods, dam spillways, GIS data, statistical methods

Context

Dam spillway blockage caused by floating woods has been known for several decades. In 1978, the Palagnedra Dam, Switzerland, suffered a complete blockage of its spillway during a 100-year flood. The resulting uncontrolled overflow almost led to the failure of the dam. Despite the risk posed to spillways and dams, the problem of floating wood is dealt with only marginally by national regulations.

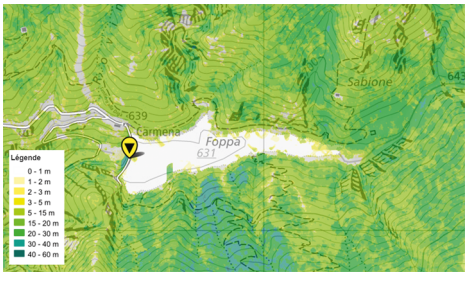
Missions and goals

The Swiss Federal Office of Energy (SFOE), as the regulatory authority responsible for monitoring the safety of dams, desired to establish a classification of dams in order to identify those most sensitive to the risk of blockage by floating wood. Moreover, the aim was to develop new approaches to define new criteria, and thus to update the Swiss national guidelines on flood safety.

Abstract

The work carried out entailed the use of the Swiss Geographic Information Systems (GIS) to extract geodata that characterise the properties of forests in the catchment areas of Swiss dams. Those parameters are characteristic both of the geometry of spillways and of the vegetation.

Statistical methods were then used to analyse the obtained data. The database was reduced using various statistical tools (correlation matrix, principal component analysis). The limited size of the studied population was a serious constraint to take into account when building predictive statistical models. It thus required some trade-offs between the number of attributes (i.e., the complexity of the problem), and the necessity for algorithms to give a stable, reliable, consistent, and quite interpretable solution. The study presents three different statistical evaluations of the likelihood of spillway clogging for each dam, using hierarchical clustering, decision tree, and logistic regression. These three approaches give slightly different results regarding blockage risk estimation, but the combination of all three minimises the uncertainties of each and constitutes a useful way to rank a large part of Swiss dam spillways according to their vulnerability to blockage caused by floating woods.



Exemple de géodonnées utilisées : hauteur de la végétation selon l'Inventaire forestier national suisse autour du barrage de Carmena (Suisse) © Flavien Chapuis, 2022. Fond de carte : Office fédéral de topographie swisstopo et Office fédéral de l'environnement, 2022, CC-BY (source : Office fédéral de topographie swisstopo).

Éléments de bibliographie

COMITÉ SUISSE DES BARRAGES et GROUPE DE TRAVAIL SUR LE BOIS FLOTTANT AUX EDC DES BARRAGES, 2017. *Bois flottant aux évacuateurs de crue des barrages*. Rapport du comité suisse des barrages sur l'état du problème lié au bois flottant pour les évacuateurs de crues (EDC) des barrages. S. L. : CSB, 82 p.

COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRS, 2013. *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages. Dams spillway design* [en ligne]. S. L. : Édition Cfbr, 328 p. Disponible sur : https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2013_evc.pdf (consulté le 16.11.2022).

PFISTER, Michael, BÉNET, Loïc et DE CESARE, Giovanni, 2020. Effet des bois flottants obstruant un évacuateur de crue dans des conditions extrêmes. *Wasser, Energie, Luft – Eau, Énergie, Air* [en ligne], vol. 112, n° 1, pp. 77-83. Disponible sur : https://arodes.hes-so.ch/record/5445?ln=fr#record-files-collapse-header (consulté le 16.11.2022).

Iyes KHALIL

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Eiffage

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Ludovic PICARD, chef du secteur ouvrages d'art

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Jean-Michel TORRENTI, enseignant, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Automatisation des cartes d'identité des BFUP et optimisation des poutres PRAD en BFUP

Mots-clés : BFUP, optimisation, automatisation, structures, poutres ITE

Contexte

Les recherches actuelles concernant le BSI® (BFUP de la marque Eiffage) chez Eiffage sont dirigées à la fois vers l'élaboration de nouvelles compositions de béton fibré et vers l'optimisation des structures construites en BFUP.

Les nouvelles compositions permettent d'avoir un large spectre de solutions en BFUP pour divers projets. Elles doivent être testées et leurs propriétés déterminées de façon rigoureuse et conformément aux normes BFUP.

Quant aux structures en BFUP, les propriétés avantageuses du matériau permettent d'optimiser la matière utilisée.

Missions et objectifs

L'objectif de ce projet est dans un premier temps de construire et d'améliorer des outils automatisés de calcul de carte d'identité des BFUP issus des essais de flexion sur prisme et sur plaque mince.

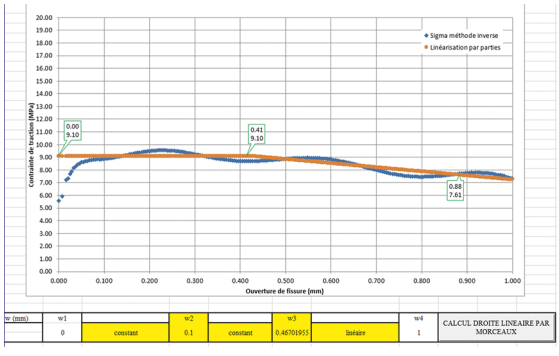
Dans un second temps, l'objectif est de réaliser l'étude d'un pont de type PRAD en BFUP, en optimisant les sections des solutions trouvées en se basant sur les outils développés en première partie.

Résumé

Ce projet de fin d'études a pour objet le développement d'outils automatisés de détermination et d'analyse des propriétés du BFUP ainsi que l'analyse des structures de type PRAD en BFUP par optimisation des sections.

Dans un premier temps, les recherches ont consisté à développer des outils permettant d'établir les cartes d'identité des BFUP à fibres métalliques dans les structures épaisses et minces à partir des résultats d'essais expérimentaux de flexion réalisés selon les normes françaises relatives aux structures en BFUP NF P 18-470 et NF P 8-710. Puis elles ont consisté à implémenter la détermination des lois de comportement de calcul pour les BFUP à fibre non métalliques non traitées par les normes actuelles.

Dans un second temps, les recherches ont consisté en l'optimisation de section des poutres en BFUP dans le cas d'ouvrages de type PRAD aux contraintes de gabarit élevées. Sont explorées la solution d'Eiffage en poutre ITE, l'ajout d'une contreflèche de fabrication et enfin un système de poutre en Té incluant une grande partie de la dalle dans la partie poutre préfabriquée. Une analyse critique des différentes solutions est effectuée et permet de les comparer.



Linéarisation du résultat de la méthode inverse automatisée d'essais de flexion 3 points sur prisme
© Iyes Khalil, 2021.

UHPRFC properties automated analysis and optimization of prestressed UHPRFC girders

Keywords: UHPRFC, optimisation, automatisation, structures, ITE beams

Context

The research regarding BSI® (Eiffage's UHPRFC brand) at Eiffage aims at the production of new fiber reinforced concrete compositions and the optimization of structures made of UHPRFC. The new compositions must be tested and their properties determined in compliance with UHPRFC norms. As for structures made of UHPRFC, the material properties allow matter optimization.

Missions and goals

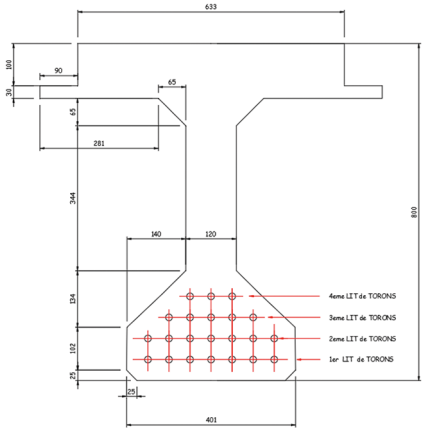
The purpose of this research is firstly to develop automated tools to determine the characteristics of new UHPRFC formulas, and secondly to analyze and optimize girders in precast prestressed bridges made of UHPFRC.

Abstract

This study consists of the developpement of automated tools to determine and analyse the mechanical properties of UHPRFC and the analysis of the optimisation of sections of precast prestressed UHPRFC girders in bridges.

Firstly, my research aimed at developing automated tools to establish the technical characteristics of metallic-fibre-reinforced concrete in thick and thin elements, based on bending tests according to the French UHPRFC norms NF P 18-470 and NF P 18-710. Furhter, my research extended to tools performing the same analysis on non-metallic UHPFRC.

Secondly, my research consisted of optimising girders in precast prestressed bridges made of UHPFRC. Different solutions were under scrutiny, namely Eiffage's ITE beams, precambering the girders, and, finally, using T-shaped beams including a significant part of the slab. A critical analysis and comparison of the different solutions allows the determination of the best solution.



Section de poutre en Té optimisée © Iyes Khalil, 2021.

Éléments de bibliographie

AFNOR, 2016. *Bétons – Bétons fibrés à ultra hautes performances – Spécification, performance, production et conformité*. NF P 18-470. Paris : AFNOR, 98 p.

RABBAT, Basile G. et RUSSEL, Henry G., 1982. Optimized Sections for Precast Prestressed Bridge Girders. *PCI Journal* [en ligne], juillet-août 1982, vol. 27, n° 4, pp. 88-108. DOI: 10.15554/pcij.07011982.88.106.

BERNARDI, Sébastien, MALIK, Vibhu, DOBRUSKY, Svatopluk *et al.*, 2017. New semi-probabilistic design method for non-structural elements made of UHPFRC. *In*: AFGC, ACI, fib, RILEM. *3rd International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concret*. 2-4 octobre 2017, Montpellier : Corum Congress Center. Disponible sur : https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2017/10/pp585-592_Bernardi_New_semi_probalistic_design_method_reviewed.pdf (consulté le 16.11.2022).

Thomas LUGINBUHL

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Nuvia Structure

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Matthieu PONCET, ingénieur études et méthodes

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Gilles FORET, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidentiel

Renforcement sismique de structures par tissu en fibre de carbone

Mots-clés : tissu en fibre de carbone (TFC), renforcement sismique, ancrage, qualification

Contexte

Le tissu en fibre de carbone (TFC) trouve de nombreuses applications dans le secteur nucléaire, pour lequel l'extension de la durée de vie des centrales ou bien encore la réévaluation des risques post-Fukushima conduisent à mettre en œuvre des quantités importantes de renforcement.

Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études est de développer et qualifier, *via* des essais, une nouvelle méthode d'ancrage du TFC plus compacte, facile à mettre en œuvre et ne constituant pas une limite à sa mobilisation à pleine capacité.

Résumé

Du fait de son faible encombrement et de son haut niveau de performance, le tissu en fibre de carbone (TFC) présente un fort potentiel dans le cadre de la croissance des marchés de maintenance et de réparation d'ouvrages.

Cependant, la principale difficulté de ce type de renforcement réside en la capacité à pouvoir ancrer les bandes de TFC sur la structure existante pour des niveaux d'efforts importants. Pour cela différentes solutions existent à l'heure actuelle : ancrage par adhérence à la structure ou bien par mèche d'ancrage en fibre de carbone. Ces systèmes ont néanmoins l'inconvénient de nécessiter une longueur d'ancrage importante avec parfois des performances réduites.

Après un état de l'art des connaissances existantes sur le sujet issu des retours d'expérience accumulés par Nuvia et de la littérature scientifique, une solution d'ancrage par enroulement sur plat métallique déclinée en différentes configurations a été imaginée et étudiée lors d'une campagne d'essai préliminaire. La méthode d'ancrage la plus performante a alors fait l'objet d'une campagne de qualification dans la perspective d'applications futures aux infrastructures nucléaires.

Banc d'essai des ancrages TFC par enroulement
© Thomas Luginbühl, 2021.

Seismic reinforcement by carbon fibre-reinforced polymer

Keywords: carbon fibre-reinforced polymer (CFRP), seismic reinforcement, anchorage, qualification tests

Context

Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) has applications in nuclear sector, where the power plants life extensions and the post-Fukushima risk assessment are leading to use a large amount of external reinforcement.

Missions and goals

The aim of this project is to develop and qualify a new CFRP anchoring method that would be more compact, easily implemented, and not limited to the mobilization of the material at its full capacity. These criteria are very important for nuclear power plants where access to structural weaknesses is difficult.

Abstract

Due to its small size and high performance, carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) has great potential for the growing markets of maintenance and repair. However, the main difficulty with this type of reinforcement lies in the ability to anchor the CFRP laminates in the existing structure at high stress levels. Various solutions currently exist: anchoring by adhesion to the structure or by carbon fibre spike anchors. However, these systems require a significant length of anchoring with sometimes reduced performance.

After a review of state of the art knowledge on the subject based on feedback from the company and scientific literature, an anchorage solution is developed that is based on winding on a steel plate declined in different configurations. Following this; the solution is implemented during a test campaign (definition of test method, monitoring, material, etc.*) in order to determine every significant parameter. The most efficient anchoring method is then tested for qualification with a view towards future applications in nuclear infrastructures.*

Fabrication des éprouvettes pour les essais d'ancrage
© Thomas Luginbühl, 2021.

Éléments de bibliographie

CADENAZZI, Thomas, 2016. *Study of an experimental anchor system – "Staple Anchors" – for externally bonded FRP laminates used for the consolidation and retrofitting of reinforced concrete structures, through an innovative double shear test method.* Mémoire de master : Travaux publics. Milan : Politecnico di Milano, University of Miami.

CHATAIGNER, Sylvain, 2008. *Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites.* Thèse de doctorat : Mécanique des matériaux et des structures. Champs-sur-Marne : université Paris Est, ENPC.

FREYSSINET, 2017. *Foreva® TFC (ou TFC H). Éléments des structures renforcés par collage de matériaux composites.* Avis Technique 3/14-757*V2 [en ligne]. Champs-sur-Marne : CSTB, CCFAT, 45 p. Disponible sur : http://www.cstb.fr/pdf/atec/GS03-D/AD140757_V2.pdf (consulté le 10.02.2021).

Alain Anthony MARDO

Élève ingénieur double diplôme
École Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth, Liban
Master Sciences des matériaux pour la construction durable (SMCD),
École des Ponts ParisTech, UPEC et UPEM

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Lafarge centre de recherche

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Renaud DE MONTAIGNAC, innovation project manager

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Alain CORFDIR, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Automatisaton de la vérification mécanique de structure de chaussées pour plusieurs pays

Mots-clés : chaussées, catalogue, trafic, fatigue, béton

Contexte

Afin de développer une infrastructure routière sûre, confortable, économique et écologique, les concepteurs cherchent à se doter d'outils adaptés pour la conception, la construction et la gestion des routes. En matière de conception, il est intéressant de développer un catalogue de dimensionnement structurel des chaussées neuves qui couvre les structures de chaussées pour la voirie urbaine.

Un catalogue de structures est un moyen pratique et rapide de conception des chaussées. Il constitue un outil performant pour les ingénieurs. Généralement ces catalogues fournissent des structures de chaussée types basées sur un nombre limité d'entrants comme le niveau du trafic, la qualité du sol support et des matériaux de construction.

Une méthode de vérification mécanique de cet ensemble de structures formant le catalogue vient compléter cette approche vu que le dimensionnement de ces structures est la plupart du temps basé sur des méthodes de dimensionnement relevant de l'expérience des praticiens ou d'autres méthodes basées sur des équations de régressions linéaires déduites par des essais sur des chaussées réelles ou en laboratoire.

Cette politique se traduit par la diminution des coûts, l'utilisation rationnelle des matériaux locaux, par une augmentation de la durée de vie structurelle et par un entretien minimal des structures.

Missions et objectifs

L'objectif de ce projet est de réaliser une méthodologie globale pour pouvoir générer les structures ainsi qu'une mise en oeuvre d'un outil de vérification mécanique et de dimensionnement de chaussées qui permettraient de fournir des conceptions plus économiques et écologiques.

Résumé

Pendant la durée de ce stage, je me suis intéressé à la génération de catalogues de structures de chaussées standards dans plusieurs pays ainsi qu'au développement d'un outil permettant la vérification mécanique de ces structures. En effet, l'intégration de ces catalogues de structures permettrait de proposer toutes les conceptions possibles tenant compte de la disponibilité des matériaux et d'autres facteurs. Suite à cette étape, l'outil aidera à optimiser les structures dans le but de révolutionner la façon de dimensionner les structures de nos jours en intégrant ces modules dans la plateforme « ORIS », plateforme globale de matériaux permettant aux professionnels de la route de prendre des décisions basées sur des données en proposant plusieurs conceptions de chaussées et options d'approvisionnement.

Cas de charge produisant une fissuration descendante (TDC)
© Alain Anthony Mardo, 2021.

Automation of mechanical verification of pavement structures for several countries

Keywords: pavements, catalog, traffic, fatigue, concrete

Context

In order to develop a safe, comfortable, economical, and environmentally friendly road infrastructure, designers constantly work on improved tools for the design, construction, and management of roads. In terms of design, there is interest in developing a structural design catalog for new pavements that covers pavement structures for urban roads.

A structural design catalog is a practical and quick way to design pavements, and a powerful tool for engineers. Usually, such catalogs provide typical pavement structures based on a limited number of inputs such as traffic level, subgrade quality, and construction materials.

This approach is completed by a mechanical verification method for the set of structures forming the catalog, since the design of these structures is mostly either based on design methods derived from practitioners' experience or based on other methods that utilize linear regression equations deduced from tests on real pavements or in the laboratory.

Overall, this approach results in cost reduction, the rational use of local materials, increased structural life, and minimal maintenance of structures.

Missions and goals

The objective of this report is to achieve a global methodology to generate structures as well as to implement a mechanical verification and pavement design tool that would provide more economical and ecological designs.

Abstract

During this internship, I studied the generation of catalogs of standard pavement structures in several countries and worked on developing a tool allowing the mechanical verification of these structures. Indeed, the integration of these catalogs of structures would make it possible to propose all possible designs at once, taking into account the availability of materials and other factors. The proposed tool aims to optimize the structures, potentially revolutionizing the way structures are designed today by integrating different possibilities into the "ORIS" platform, a global materials platform that allows road professionals to make data-driven decisions by proposing several pavement designs and procurement options.

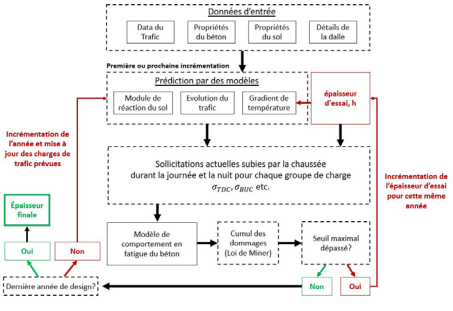


Schéma explicatif de la démarche pour le calcul de l'épaisseur finale en béton © Alain Anthony Mardo, 2021.

Éléments de bibliographie

BURMISTER, Donald, PALMER, L. A., BARBER, E. S. *et al.*, 1944. The theory of the stress and displacements in layered systems and applications of design of airport runway. *Proceeding of the highway research board*, vol. 23, pp. 126-148.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES et SERVICE D'ÉTUDES SUR LES TRANPORTS, LES ROUTES ET LEURS AMÉNAGEMENTS (SETRA), 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. Paris, Bagneux : LCPC, SETRA.

WESTERGAARD, Harold M., 1926. Stresses in concrete pavements computed theoretical analysis. *Public Roads*, avril 1926, vol. 7, n° 2, pp. 25-35.

Pierre MONCHANIN

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission recherche réalisée à :
Artelia

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Nabil YAZBECK, directeur pôle ponts et ouvrages d'art

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Laurence DAVAINE, responsable de module, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

La technologie des ponts à âmes plissées. État de l'art et étude de conception détaillée

Mots-clés : poutre caisson en béton précontraint à âmes plissées, ponts mixtes, pont en béton précontraint construit par encorbellements successifs, Viaduc de la Sioule

Contexte

Inventée à la fin des années 1980 par l'ingénieur français Pierre Thivans, la technique des ponts à âmes plissées n'a vu naître en France que 5 ouvrages de portées limitées (< 93 m) et dont la majorité ont été construits avant 1994. Pourtant, le remplacement des âmes, classiquement en béton, dans les ponts caisson en béton précontraint par de la tôle métallique plissée devrait permettre à la technique d'atteindre des portées bien plus élevées, de l'ordre de 200 à 250 m. De plus, en Asie, notamment au Japon, et plus récemment en Chine, plus de 300 ouvrages à âmes plissées ont été conçus ces 25 dernières années. La portée maximale alors atteinte sans haubanage est de 179 m. Les nombreux exemples asiatiques prouvent donc l'intérêt à la fois technique et économique de la méthode, mais cette dernière n'est pas utilisée dans le domaine de très grandes portées pour lequel elle devrait permettre des économies de matière prometteuses.

Missions et objectifs

L'objectif du stage a tout d'abord été d'effectuer un état de l'art de la technique, le savoir-faire européen sur les âmes plissées étant très faible en comparaison des connaissances asiatiques. Cet état de l'art a ensuite permis de passer une application d'un ouvrage à âmes plissées de très grande portée (230 m) sur la brèche du viaduc de la Sioule en France. Il a ainsi été observé que les ouvrages asiatiques disposent de manière générale d'une forte marge de dimensionnement, qui amoindrit les gains provoqués par la technique des âmes plissées.

Résumé

L'application d'une solution à âmes plissées sur la brèche du viaduc de la Sioule a permis de confirmer la possibilité de justifier de manière raisonnable une travée de 230 m. Les gains que l'on pouvait pressentir sur la technique ont pu être vérifiés. En effet, le coût global de l'ouvrage a par exemple été réduit de 6 % et la durée de construction d'un fléau accélérée de 130 %. Après cette étude, on conclut qu'une travée de l'ordre de 250 m ou même davantage pourrait être justifiée sans problème à la fois structurellement et économiquement en Europe. La technique des ponts à âmes plissées pourrait alors tenter de concurrencer d'autres méthodes plus traditionnelles comme les ponts haubanés ou les ponts à précontrainte extradossée.

Corrugated steel web bridges. State of the art and detailed design

Keywords: box girder in prestressed concrete with corrugated steel webs, composite bridges, balanced cantilever bridges in prestressed concrete, Sioule Viaduct

Context

Created at the end of the 1980s by the French engineer Pierre Thivans, there are a total of 5 corrugated steel web bridges in France, all of them with a limited span (< 93 m) and the majority built before 1994. However, replacing the classic concrete webs of prestressed concrete girder bridges with corrugated steel webs should allow these bridges to reach much higher spans, approximately between 200 and 250 m. Moreover, in the last 25 years, more than 300 corrugated steel web bridges have been constructed in Asia, mainly in Japan and more recently in China. The maximum span reached here without guying is 179 m. The numerous Asian examples thus show the great technical and economic potential of corrugated steel webs. Nevertheless, the technique is not employed in the field of very large spans, in which it should enable promising material savings.

Missions and goals

The purpose of this internship was firstly to study the state of the art of corrugated steel web bridges, taking into account that European knowledge on the technique is more limited than in Asia. This study was then used to undertake an application of a very long span (230 m) corrugated steel web bridge on the gap of the Sioule viaduct in France. It was observed that Asian structures generally have a large design margin, which reduces the gains from the corrugated steel web technique.

Abstract

The application of a corrugated steel web solution to the Sioule viaduct confirmed that a 230 m span could be reasonably designed. The gains that could be expected from the technique were verified. For example, the overall cost of the structure was reduced by 6% and the construction time of a cantilever was accelerated by 130%. Based on this study, we can conclude that a span near 250 m or more could be justified both structurally and economically in Europe without problems. Corrugated steel web bridges could then compete with more traditional alternatives such as extradosed prestressed bridges or cable-stayed bridges.

Éléments de bibliographie

HE, Jun, WANG, Sihao, LIU, Yuqing *et al.*, 2021. The development of composite bridges with corrugated steel webs in China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering* [en ligne], mars 2021, vol. 174, n° 1, pp. 28-44. DOI: 10.1680/jbren.19.00018.

KATO, Hisato, KAWABATA, Atsunori et NISHIMURA, Nobuo, 2002. Practical calculation formula on displacements and stress resultants of steel-concrete mixed girders with corrugated steel web. *Doboku Gakkai Ronbunshu* [en ligne], vol. 703, pp. 293-300. DOI: 10.2208/jscej.2002.703_293.

YI, Jongwon, GIL, Heungbae, YOUM, Kwangsoo *et al.*, 2008. Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs. *Engineering Structures* [en ligne], juin 2008, vol. 30, n° 6, pp. 1659-1666. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.11.009.

Roland TOURNADE

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Eiffage Infrastructures Côte d'Ivoire

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Thierry THEODORE, directeur de projet

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Michel GUERINET, enseignant, École des Ponts ParisTech

Étanchéité du barrage de Singrobo-Ahouaty

Mots-clés : barrage en remblai, voile d'injection, masque amont en géomembrane, drainage, plinthe

Contexte

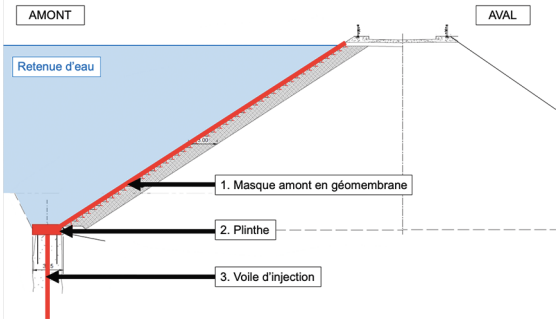
L'étanchéité d'un barrage représente un enjeu complexe et indispensable à maîtriser pour son fonctionnement et sa sûreté. Ce projet de fin d'études chez Eiffage Infrastructures Côte d'Ivoire étudie les méthodes d'étanchéité retenues pour le barrage hydroélectrique de Singrobo-Ahouaty. Cet ouvrage d'une longueur de 1,3 km et d'une hauteur maximale de 31,5 m doit retenir un réservoir d'une capacité de 105 millions de m^3, tout en s'adaptant au nouveau contexte géologique révélé par la dernière campagne géotechnique.

Missions et objectifs

La mission consiste à participer au dimensionnement des ouvrages d'étanchéité (membrane sur parement amont, voile d'étanchéité amont par injections, plinthe, drainage), à suivre les essais sur le site du chantier (convenances, plots d'essais, *etc.*), à concevoir les méthodes, les phasages, les contrôles et les interfaces entre les travaux d'étanchéité, de génie civil et de terrassement, et de vérifier sur le terrain l'applicabilité de ces méthodes aux travaux dans le cadre du planning défini.

Résumé

L'étanchéité du parement amont du remblai est assurée par un masque en géomembrane, appuyé sur un revêtement en béton. Ce procédé est encore peu utilisé dans les barrages en remblai, avec deux références majeures : Runcu (Roumanie) et Nam Ou VI (Laos). La mise en place de ce dispositif impacte fortement le dimensionnement de l'ouvrage : un béton extrudé poreux spécifique au projet est développé pour constituer le support de pose de la membrane sur le parement amont du barrage et un filtre en matériau 0/80 mm est réalisé pour permettre le drainage des éventuelles eaux de fuite. Ce masque en géomembrane est ancré en pied de barrage sur une plinthe en béton, conçue pour assurer la connexion entre l'étanchéité du corps du remblai et les injections de la masse rocheuse. La campagne géotechnique réalisée sur le site du barrage de Singrobo-Ahouaty a confirmé la nécessité de développer des méthodes d'injection spécifiques en réponse aux différents faciès rocheux observés sur le site (granodiorite et métavolcanite). Les méthodes des travaux d'étanchéité (réalisation des bordures en béton extrudé, voile d'injection, plinthe) requièrent d'importants essais préalables (études bétons, planches d'essai, convenances), une forte coordination entre les différents métiers (génie civil, terrassement, minage, injections), une analyse des risques avancée et un contrôle qualité rigoureux pour garantir la durabilité de l'ouvrage. Les méthodes ont été confrontées à la réalité avec le lancement des travaux de la plinthe, qui ont mis en évidence les optimisations envisageables.



Ouvrages d'étanchéité du barrage de Singrobo-Ahouaty – Coupe de principe © Roland Tournade, 2021.

Waterproofing solutions of Singrobo-Ahouaty dam

Keywords: rockfill dam, grouting, waterproofing, upstream geomembrane facing, seepage, plinth

Context

Waterproofing is an essential challenge for the operation and safety of dams. This project presents the sealing methods used for the Singrobo-Ahouaty hydroelectric dam (Ivory Coast). This structure of a length of 1.3 km and a maximum height of 31.5 m has to retain a reservoir with a maximum capacity of 105 million m³.

Missions and goals

The mission is to participate in the design of the sealing works (upstream geomembrane facing, grouting, plinth, drainage); to carry out the tests on the working site; to elaborate methods, construction processes, controls, and interfaces between sealing, civil engineering, and earthworks; and to check the applicability of these methods in the field.

Abstract

A geomembrane – an innovative process for rockfill dams – ensures the sealing of the upstream facing of the embankment. The choice of this sealing system strongly affects the size of the structure: a specific porous extruded concrete is developed for anchoring the geomembrane and a rock filter is made to allow the drainage of possible leakage. This geomembrane mask is anchored at its base by a concrete plinth, designed to ensure the connection between the seal of the embankment body and the injections of the rock mass. The geotechnical campaign carried out on the Singrobo-Ahouaty dam site confirmed the need to develop specific injection methods in response to different geological layers observed on site. Methods of waterproofing works require many suitability tests, strong coordination between different works (civil engineering, earthworks, mining, injections), an advanced risk analysis, and a rigorous quality control to guarantee the durability of the structure.

Travaux de réalisation des bordures en béton extrudé, Barrage de Singrobo-Ahouaty © Roland Tournade, 2021.

Éléments de bibliographie

LOMBARDI, Giovanni, 2003. *L'injection de masses rocheuses*. Rabat, Minusio : Comité Marocain des Grands Barrages. 43 p.

Antoine WANTZ

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Ingérop Conseil et Ingénierie

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Laurence DAVAINE, chef de service Ouvrages d'art métalliques et mixtes

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Olivier BAVEREL, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 5 ans - Confidential

Les *network arches*. État de l'art et conception

Mots-clés : *network arch*, réseau de suspentes, finesse, économie de matière

Contexte

Les enjeux socio-économiques et environnementaux nécessitent de concevoir des ouvrages d'art plus économes en matière, à la faveur d'une répartition optimisée des efforts et au recours à des matériaux plus performants. Pour répondre à cet objectif, certaines typologies d'ouvrage ont connu des évolutions significatives. Les *bow-string* en *network arch* permettent d'économiser jusqu'à 2/3 de quantité d'acier et sont un exemple probant d'évolution répondant aux nouveaux enjeux de conception.

Missions et objectifs

L'objectif du projet de fin d'études est de mesurer la performance des *network arches* (arc auto-ancré à suspentes inclinées et entrecroisées) vis-à-vis d'un *bow-string* classique (arc auto-ancré à suspentes verticales) en proposant une solution en *network arch* alternative d'une solution en *bow-string* dans le cadre d'un projet de maîtrise d'œuvre concret. Les deux solutions sont ensuite comparées selon différents critères : méthodes de réalisation, faisabilité technique et risques, coûts économiques et environnementaux.

Résumé

Le concept de *network arch*, variante des ponts *bow-string*, est né des études menées sur le sujet à partir de 1956 par l'ingénieur-docteur norvégien Peter Tveit.

L'intérêt d'un pont *bow-string* est d'éliminer les efforts de poussée horizontaux transmis aux appuis en les reprenant dans le tablier de l'ouvrage alors soumis à des efforts de traction auto-équilibrés, rendant l'ouvrage isostatique.

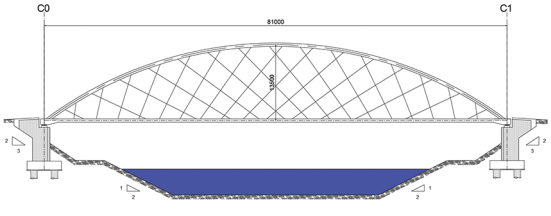
Afin d'assurer la transmission à l'arc des efforts appliqués sur le tablier, des suspentes généralement verticales sont mises en place. Le concept de *network arch* développé par Tveit consiste en une évolution de la disposition des suspentes verticales d'un *bow-string* en un réseau de suspentes inclinées et entrecroisées, disposées de façon optimisée afin de créer une âme rigide reliant le tablier et l'arc.

Le fonctionnement en réseau du système de suspentes permet de limiter significativement les efforts de flexion dans l'arc et dans le tirant. Les efforts axiaux sont prépondérants et permettent de mettre en œuvre des arcs élancés et économes en quantité de matière.

Dans le tablier, les efforts de flexion étant considérablement réduits vis-à-vis d'un *bow-string*, cela permet au tablier de conserver uniquement un fonctionnement en tirant, soumis à de la traction générée par la poussée de l'arc. Cette propriété est favorable à la mise en œuvre d'un tablier de type dalle en béton, précontrainte longitudinalement. Le rôle des câbles de précontrainte étant de reprendre le tirant induit dans la dalle et de permettre à cette dernière de rester comprimée.

Ce type de solution permet de ne pas avoir recours à une charpente métallique pour le tablier, générant une économie d'acier considérable.

L'étude comparative d'une solution en *network arch* et d'une solution en *bow-string* a mis en évidence une forte économie d'acier. Les méthodes de réalisation sont cependant plus complexes et moins répandues expliquant leur faible essor.



Network arch, élévation longitudinale
© Antoine Wantz, 2021.

Network arches. Study of the art and applied design

Keywords: network arches, hangers network, slenderness, steel saving

Context

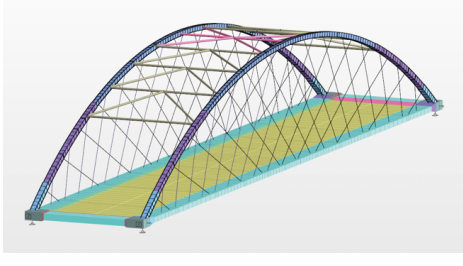
The design of sustainable civil engineering structures is one of the major challenges of the 21st century. Savings in material are only made possible through the optimization of stress distribution inside the structures and the use of more efficient materials. To increase material economy, certain types of structures have undergone significant changes. In this study, we trace how the evolution of bow-string bridges into network arches enables up to 2/3 in steel savings and makes the structures more sustainable.

Missions and goals

The aim of this Master Thesis is to evaluate network arch efficiency and its economic implications for applied civil engineering projects. A comparative study of a bow-string bridge and its sustainable network arch alternative is conducted to assess savings in steel and to quantify the economic potential of this solution. The two structures are compared according to different criteria: feasibility, risks, financial and environmental costs, and life cycle analysis.

Abstract

A network arch, as developed since 1956 by Dr.Eng. Peter Tveit from Norway, is a competitive alternative to a bow-string bridge. The asset of a bow-string bridge is that the horizontal thrust at the end of the arch is directly carried by the tie, so that the tensile force remains in the bridge deck. Statically speaking, bow-string bridges and network arch bridges are isostatic. In a bow-string bridge, the loads applied on the deck are transferred to the arch through vertical hangers. The key innovation of network arches as designed by Peter Tveit is to increase the number of hangers and to incline them, making them cross each other at least twice. The aim is to create a stiff web between the tie and the arch. The crossing of the hangers enables minimal bending in the chords of the bridge. As in a truss beam, the axial forces are predominant, leading to a significant saving of matter in the arch and high slenderness for the bridge. The bending in the deck is significantly reduced compared to a bow-string bridge so that the deck only works as a tie, and no longer as a bending beam. This property of network arch decks leads to the replacement of usual steel-concrete composite decks by concrete longitudinally prestressed decks. Prestressing ensures tie behavior and keeps the deck under compression. This saves the cost of the steel girder. As a result, the savings in steel achieved by a network arch bridge as compared to a bow-string bridge are significant. However, the feasibility of network arch bridges is more challenging and requires a high technicity. Therefore, the implementation of network arch bridges in France remains limited to this day.



Network Arch, vue modèle éléments finis 3D
© Antoine Wantz, 2021.

Éléments de bibliographie

TEICH, Stephan, 2012. *Beitrag zur Optimierung von Netzwerkbogenbrücken*. Thèse de doctorat : Génie civil. Dresde : Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden.

TEICH, Stephan, 2011. Entwicklung allgemeiner Entwurfsgrundsätze für Hängernetze von Netzwerkbogenbrücken. *Stahlbau*, février 2011, vol. 80, n° 2, pp. 100-111.

Sabine BOULVARD

Élève ingénieure concours commun
Parcours Structure et architecture

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Duc Toan PHAM, ingénieur de recherche et expertise

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Patrick DE BUHAN, professeur, École des Ponts ParisTech

Dimensionnement au feu des éléments de structure en béton armé en flexion composée déviée

Mots-clés : flexion composée déviée, béton armé, incendie, calcul à la rupture, diagramme d'interaction

Contexte

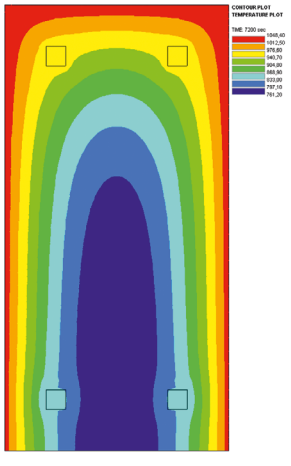
La majorité des poteaux structurels sont dans un état de flexion composée, c'est-à-dire une combinaison simultanée d'une compression axiale et d'un moment de flexion. Lorsque le moment de flexion est autour d'un axe quelconque, on parle de flexion composée déviée ou de biflexion. Si la flexion composée déviée est déjà compliquée à traiter dans le cas standard, elle l'est encore plus lorsque l'élément de structure étudié est soumis au feu en raison de l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs.

Missions et objectifs

L'objectif du présent travail est de développer un outil simple pour déterminer les efforts de rupture d'une section en béton armé soumise à une flexion composée déviée en situation d'incendie. Après un travail bibliographique sur les méthodes existantes, pour notamment identifier leur avantages et inconvénients lors d'une application d'ingénieur, une nouvelle solution semi-analytique a été proposée pour le dimensionnement au feu d'une section en béton armé à la flexion composée déviée, en fonction de n'importe quelle distribution de température dans la section. Les prédictions théoriques ont ensuite été comparées avec les résultats issus d'une simulation numérique à l'aide d'un logiciel aux éléments finis d'une part, et avec des résultats expérimentaux disponibles dans la littérature d'autre part.

Résumé

Il s'agit ici de mettre en œuvre une approche de type calcul à la rupture, permettant de déterminer directement les charges de ruine d'une structure à partir de la compatibilité entre l'équilibre de la structure et le critère de résistance des matériaux constitutifs (le béton et l'acier). En changeant l'orientation de la section, un diagramme d'interaction de l'effort normal et du moment de flexion, permettra de dimensionner une section quelconque en flexion composée déviée. Des calculs ont été réalisés à température ambiante, puis en condition d'incendie en introduisant des facteurs de réduction pour la résistance des matériaux en fonction de l'augmentation de la température. La distribution de températures dans la section est obtenue à l'aide d'une simulation numérique avec Safir, un logiciel aux éléments finis utilisé largement dans le domaine de l'ingénierie de sécurité incendie. Les résultats de prédiction théoriques ainsi obtenues ont été comparées favorablement à celles fournies par l'Eurocode 2 et Safir dans le cas d'une flexion composée simple (non déviée), puis à des résultats expérimentaux (à la fois à température ambiante, et en condition d'incendie) disponibles dans la littérature.



Profil de température obtenu sur Safir [3] pour une section en béton de 10 cm par 20 cm, avec quatre aciers de 10 mm de diamètre, soumise à une température ISO pendant deux heures © Sabine Boulvard, 2021.

Fire design of reinforced concrete structural members under deviate bending

Keywords: biaxial Interaction diagrams, reinforced concrete, fire, yield design

Context

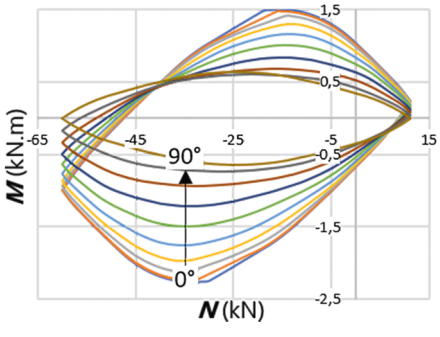
The design of reinforced concrete (RC) column sections is still a rather complex task since most structural columns are subjected to axial load and bending about two axes. Such a task becomes much more complex under fire conditions, when the influence of temperature increase on the mechanical properties of the constituent materials needs to be taken into account.

Missions and goals

The objective of the present work is to develop a simple tool in order to determine the failure loads of reinforced concrete (RC) sections subjected to axial load and bending about any orientation of their neutral axis under fire conditions. After a state-of-the-art of available design methods, a new semi-analytical formulation is proposed for the design of RC sections under such conditions, as function of any prescribed temperature distribution on the section. The theoretical predictions are then compared with the results of a numerical simulation using a finite elements software on the one hand, and with certain available experimental results on the other.

Abstract

A lower bound static approach of Yield Design was implemented to determine the failure loads of reinforced concrete (RC) column sections from the compatibility between the static equilibrium of the structure and the strength criteria of the constituent materials (concrete and steel). Based on the result, a normal force-bending moment interaction diagram may be established for any orientation of the section. Calculations were carried out at ambient temperature, then in fire conditions by introducing reduction factors for the strength of the materials as a function of temperature increase. The temperature distribution in the section was obtained using a numerical simulation with Safir, a finite elements software widely used in the field of fire safety engineering. The theoretical predictions thus obtained were compared favourably with those provided by Eurocode 2 and SAFIR for uniaxial bending, and then with test results (both at ambient temperature and under fire conditions) available in the literature.



Diagrammes d'interaction obtenus pour la section présentée en figure 1, pour des orientations allant de 0 ° (bleu) à 90 ° (marron), tous les 10 © Sabine Boulvard, 2021.

Éléments de bibliographie

BLEYER, Jeremy, BUHAN (de), Patrick, 2013. Yield surface approximation for lower and upper bound yield design of 3D composite frame structures. *Computers and structures*, n° 129, pp. 86-98.

FRANSSEN, Jean-Marc, 2011. *User's manual for SAFIR 2011: a computer program for analysis of structures subjected to fire*. Liège : University of Liege.

PHAM, Duc Toan, BUHAN (de), Patrick, FLORENCE, Céline *et al.*, 2015. Interaction diagrams of reinforced concrete sections in fire: A yield design approach. *Engineering Structures*, n° 90, pp. 38-47.

Anne BURKHARD

Élève ingénieure architecte

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Elioth, Egis Concept

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Lucas GRISONI, ingénieur structure chef de projet

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Stéphane HAMEURY, enseignant, Centre scientifique et technique du bâtiment

Comportement au feu des structures

Mots-clés : incendie, feu, ingénierie de la sécurité incendie, structure, bois

Contexte

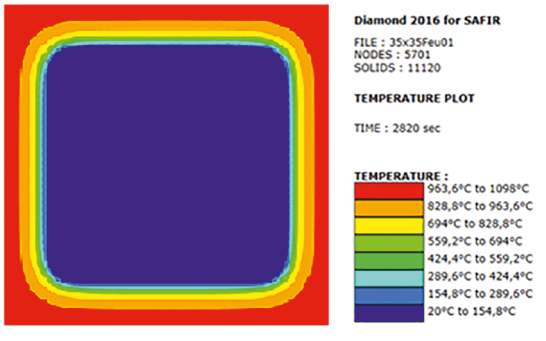
L'urgence de la transition écologique à l'échelle globale pousse le secteur de la construction à s'interroger en profondeur sur ses pratiques. La nécessaire réduction des émissions de CO_2 induites par la construction conduit à recourir de plus en plus à des matériaux biosourcés. Ces derniers présentent généralement la caractéristique d'être inflammables et d'apporter une masse combustible potentiellement significative dans les bâtiments. L'analyse du comportement en situation d'incendie de telles constructions devient alors un enjeu central de la conception. En effet, la réglementation prescriptive actuelle limite l'innovation et le recours aux matériaux biosourcés. La sécurité incendie – réaction au feu des matériaux, résistance au feu des ouvrages, sécurité des personnes – est une exigence clé pour l'intégration des innovations dans la construction.

Missions et objectifs

Dans ce contexte de recherche d'amélioration scientifique sur les approches performantielles de la construction bois et de montée en compétence au sein du bureau d'études Elioth sur le sujet de la sécurité incendie, l'objectif de ce projet de fin d'études consiste tout d'abord à appréhender et s'approprier les enjeux et spécificités du dimensionnement des structures (en bois notamment) exposées au feu, puis à participer dans l'équipe « structure » d'Elioth à la mise en place d'outils, sur la base de données d'entrée de conditions de température et flux thermiques auxquelles la structure est réellement exposée.

Résumé

Le développement de ces compétences passe tout d'abord par la reprise d'études existantes, qui sont autant de cas concrets pour fiabiliser les outils de dimensionnement mis en place, avant de les appliquer à des projets en cours, par exemple la conception de la charpente acier extérieure non protégée à l'incendie du projet de logement « La Serre » à Issy-les-Moulineaux. La reproduction de l'étude de faisabilité de l'application de l'ingénierie de la sécurité incendie aux bâtiments en bois portée par l'ADIVBois a permis de vérifier la structure en R+6 étudiée, soumise à des actions thermiques issues de calculs de développement du feu, selon différents scénarii d'incendie réel. Cette étude a montré qu'il n'y avait pas de point bloquant pour son exploitation dans la vérification de la résistance au feu des éléments structuraux.



Profil de température à 2 820 s au sein d'une section 350 × 350 mm en bois sous charge incendie maximale © Anne Burkhard, 2021.

Fire behavior of structures

Keywords: fire, fire safety engineering, structure, wood

Context

The urgency of the ecological transition on a global scale is pushing the construction sector to question its practices in depth. The necessary reduction of CO_2 emissions induced by construction is leading to the increased use of biosourced materials. However, these materials are generally flammable and contribute a potentially significant combustible mass to buildings. The analysis of such constructions under fire conditions becomes then a central issue of the design. Indeed, current prescriptive regulations limit innovation and the use of biosourced materials. Fire safety – concerning the reaction of materials to fire, the fire resistance of structures, and human safety – is a key requirement for the integration of innovations in construction.

Missions and goals

In the context of research aiming at the scientific improvement of performance approaches to wood construction and increasing competence at the Elioth Design Office on the subject of fire safety, the objective of this graduation project is first to understand and assimilate issues connected to the design of (mostly wood) structures exposed to fire, and then to participate, with the "structure" team, in the implementation of tools based on boundary conditions of temperature and thermal flow to which the structure is concretely exposed.

Abstract

The development of these skills is first of all based on the analysis of existing studies, which offer concrete cases that can help make dimensioning tools more reliable before they are applied to current projects, for example the design of the external steel structure of the housing project "La Serre" in Issy-les-Moulineaux, which is not protected against fire. The reproduction of a feasibility study on the application of fire safety engineering to wooden buildings, carried out by ADIVBois, allowed the verification of the studied 6-floor structure as subjected to thermal actions from fire development calculations according to different real fire scenarios. The procedure showed that there are no roadblocks to the utilization of the study in the verification of the fire resistance of structural elements.

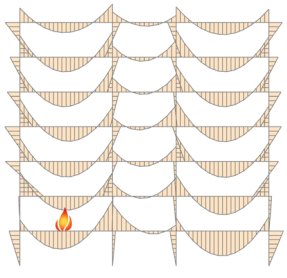


Diagramme des moments dans portique avec incendie localisé au R+1 au moment de la ruine © Anne Burkhard, 2021.

Éléments de bibliographie

ADIVBOIS, 2018. *Étude de faisabilité de l'application de l'ingénierie de la sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur* – Partie 3 : Approches numériques d'évaluation du comportement sous feux réels de structures bois. Rapport Efectis-CSTB. Codifab.

AFNOR, 2009. *Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu Indice de classement. Indice de classement*. NF EN 1995-1-2. Afnor éditions, 74 p.

PROJET NATIONAL DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT INGÉNIERIE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE (PNISI), 2011. *Formalisation de la méthodologie générale*. S. L. PNISI, 108 p.

Inès CHAMPAGNE

Élève ingénieure concours commun

Promotion 2020

Mission recherche réalisée à :
Laboratoire Géométrie, Structure, Architecture, École nationale supérieure d'architecture Paris-Malaquais

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Maurizio BROCATO, directeur de laboratoire, professeur HDR-chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Denis GARNIER, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Modélisation aux EF des structures en pierre avec la méthode du « bloc-à-bloc »

Mots-clés : maçonnerie, éléments finis, arche, Cast3M, décintrement

Contexte

Au lendemain de l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, le CNRS mène un chantier scientifique en vue de sa restauration. L'état structurel actuel de la cathédrale est presqu'impossible à déterminer car nous ne connaissons pas exactement son histoire structurelle. C'est pourquoi un consortium scientifique, dont le GSA fait partie, a été fondé afin de proposer une évaluation structurale des voûtes de la cathédrale.

Missions et objectifs

Ce mémoire prend place dans ce projet de diagnostic et vise à vérifier deux hypothèses de base du modèle aux éléments finis utilisé par le GSA pour le diagnostic : l'impact du phasage de construction sur la mise sous poids propre d'une structure maçonnée et l'influence d'une temporalité dans la modélisation de l'incendie.

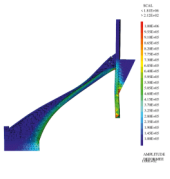
Résumé

Plus qu'une étude aux éléments finis, ce rapport cherche à comprendre comment modéliser les structures en pierre, qui sont généralement liées à un savoir traditionnel et géométrique. Quel apport le numérique peut-il fournir aux connaissances sur la pierre qui ont permis de construire nos plus beaux monuments/bâtiments ?

De l'arche plein-cintre à l'arc-boutant en passant par le pont à arches surbaissées, nous traversons les méthodes et les époques afin de mieux comprendre le comportement des structures en pierre. Nous nous appuyons sur des modélisations bloc à bloc aux éléments finis faites avec le logiciel Cast3M pour construire entre autres un modèle qui mime la construction d'une arche.

Dans une certaine mesure, nous voyons que les hypothèses prises par le consortium sont valides et ne faussent pas les résultats. Par ailleurs, le modèle de phasage de construction nous permet de mieux comprendre comment les contraintes circulent dans une arche lorsqu'elle se stabilise. Ce modèle peut appuyer et confirmer certaines anciennes théories (la construction simultanée des arches du Pont de Nemours) et même les prolonger (diagnostic de Notre-Dame).

Le modèle de phasage de construction possède un réel potentiel d'aide à la modélisation des structures en pierre. Sous réserve d'améliorations, le modèle pourrait nous permettre de modéliser et tester les méthodes de construction d'arche, de mieux comprendre la modélisation, d'intuiter des connaissances perdues sur la construction des cathédrales…



Contraintes de Von Mises dans un arc-boutant de la cathédrale de Notre-Dame de Paris (déformée x 100) © Inès Champagne, 2021.

Finite element modeling of stone structures with a "stone-by-stone" method

Keywords: masonry, finite elements, arche, Cast3M, decentering

Context

In the aftermath of the fire at the Notre-Dame de Paris Cathedral, the CNRS is leading a scientific project for restoration of the structure. The current structural state of the cathedral is almost impossible to determine because we have no exact knowledge of the cathedral's structural history. That is why a scientific consortium, of which the GSA is a member, was founded to propose a structural evaluation of the cathedral's vaults.

Missions and goals

This thesis is part of this diagnostic project and aims at verifying two basic hypotheses of the finite element model used by the GSA for the diagnosis: the impact of the construction phasing on the self-weighting of a masonry structure and the influence of a temporality in the modeling of the fire.

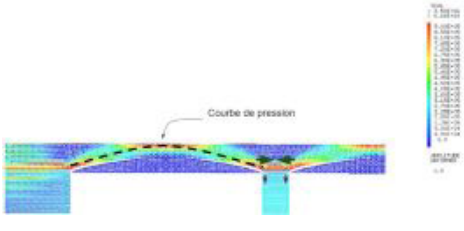
Abstract

More than a finite element study, this report seeks to understand how to model stone structures, which are generally linked to traditional and geometrical knowledge. What contribution can digital technology make to the understanding of stone that has allowed us to build our most beautiful monuments/buildings?

From the round arch to the flying buttress and the low arch bridge, we traverse methods and periods to better understand the behavior of stone structures. We rely on block-by-block finite element modeling with Cast3M software to build, among others, a model that mimics the construction of an arch.

To some extent, we see that the assumptions made by the consortium are valid and do not distort the results. Furthermore, the construction phasing model allows us to better understand how stresses flow through an arch as it stabilizes. This model can support and confirm some old theories (the simultaneous construction of the arches of the Pont de Nemours) and even extend them (diagnosis of Notre-Dame).

The construction phasing model has a real potential to help in the modelling of stone structures. Subject to improvements, the model could allow us to model and test the methods of arch construction, to better understand the modeling, and to access lost knowledge on the construction of cathedrals.



Contraintes de Von Mises dans le cas du pont
de Nemours après son décintrement (déformée x 1)
© Inès Champagne, 2021.

Éléments de bibliographie

BOISTARD, Louis-Charles, 1822. *Recueil d'expériences et d'observations faites sur différens travaux exécutées pour la construction du pont de Nemours, pour celle de l'arsenal et du port militaire d'Anvers*. Paris : J-S Merlin Libraire.

HEYMANN, Jacques, 1995. *The Stone Skeleton, Structural engineering of masonry architecture*. Cambridge : Cambridge University Press.

PERRONET, Jean-Rodolphe, 1987. *Construire des Ponts au XVIII^e siècle*. Paris : Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 340 p.

Chloé LEFEU

Élève ingénieure architecte

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
T/E/S/S atelier d'ingénierie

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Simon AUBRY, ingénieur associé

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Arthur LEBÉE, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Enjeux de la conception de toiles tendues déployables de type "Ridge & valley"

Mots-clés : toile, membrane, structure tendue, déployabilité

Contexte

En 2019, la Fédération Française de Tennis lance le concours pour la couverture mobile du court Suzanne Lenglen, à Roland-Garros. Le groupement dirigé par Dominique Perrault Architecture remporte le marché et le bureau d'études T/E/S/S est en charge des études de structures / enveloppes. Le projet retenu est composé d'une toiture fixe métallique en forme de U recouvrant les gradins et d'une toiture mobile aérienne et minimaliste composée de modules de toile tendue. Ce matériau très léger et flexible est parfaitement adapté au franchissement de grandes portées ne nécessitant pas de clos-couvert et admettant de grands déplacements de toitures. Les structures tendues ont cependant un fonctionnement spécifique, influencé par plusieurs paramètres comme la double courbure ou la précontrainte. Il n'existe actuellement pas d'Eurocodes encadrant leur dimensionnement, qui demande donc une attention particulière.

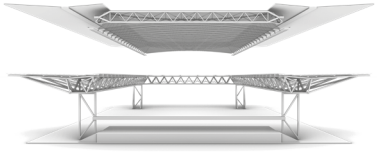
Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études propose une étude des enjeux de la conception de toiles tendues

déployables. Il introduit dans une première partie le fonctionnement des structures déployables en toile tendue ainsi qu'un état de l'art de réalisations de la typologie "Ridges & valleys", elles aussi déployables. En effet, plusieurs stratégies de mobilité peuvent être mises en place avec des impacts variables sur la structure fixe et la toile tendue mobile. De la même manière, plusieurs méthodes sont mises en œuvre pour assurer l'étanchéité des détails en bout de vallée. Leurs implications esthétiques comme pratiques sont variables.

Résumé

Cette étude permet de comprendre les singularités du projet de couverture du court Suzanne Lenglen : le fait de dissocier les mécanismes de mobilité et de tension de la toile permet d'alléger la structure, et crée aussi la situation inédite de la position déployée non étarquée. La toile y est extrêmement peu tendue et admet des déplacements conséquents, ce qui engendre des problématiques sortant du cadre des normes existantes. Trois points sont ensuite présentés en détails : la forme repliée de la toile, son comportement dynamique au vent et la conception et le dimensionnement d'un détail d'évacuation des eaux pluviales. La variation d'étarquage évoquée ci-dessus exerce une influence directe sur les deux premiers points, et rajoute une contrainte supplémentaire pour le troisième point.



Axonométrie du projet de couverture © Chloé Lefeu, 2021.

Design challenges of deployable tensile roofs of type "Ridge & valley"

Keywords: fabric, membrane, tensile structure, deployability

Context

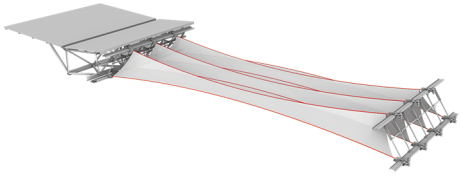
In 2019, the French Tennis Federation launched a tender for the mobile roofing of the Suzanne Lenglen Court. The group led by Dominique Perrault Architecture was granted the tender, with T/E/S/S overseeing structural and envelope studies. The project is composed of a fixed, U-shaped metallic roof covering the stands and an aerial, movable roof composed of membrane modules. This material is light and flexible, making it appropriate for large spans and allowing extensive movement. Tensile structures have a specific behavior influenced by several parameters such as double curvature or pre-stressing. No Eurocode currently exists to supervise their conception, which is a point that requires particular attention.

Missions and goals

This master thesis proposes a study on the challenges involved with conceiving deployable tensile fabric structures. The first part introduces the behavior of such structures via *a state of the art of deployable "Ridges & valleys" structures. Many mobility strategies are encountered, each with different impacts on the structure. In the same way, several methods exist to ensure the waterproofing of the end of the valley cable, with varying esthetic and practical consequences.*

Abstract

This study highlights the singularities of the roof project of the Suzanne Lenglen Court: the dissociation between the mechanisms of mobility and tension lightens the structure and creates a unique situation of "deployed partially tensed". The membrane is lightly tensed and allows for large movements, which creates problematics not covered by current norms. Three points are emphasized in particular: the folded shape of the fabric, its dynamical behavior, and the conception of a detail of rainwater evacuation. The partial tension of the fabric has a direct influence on the two first points and is an additional constraint for the last.



Principe de fixation de la toile tendue © Chloé Lefeu, 2021.

Éléments de bibliographie

BIGER, Bariteau *et al.*, 1997. Recommandations pour la conception des ouvrages permanents de couverture textile (Partie I). *In*: *Annales de l'ITBTP*, n° 4, pp. 5-16.

BLUM, Rainer, BÖGNER, Heidrun et NÉMOZ, Guy, 2004. Material properties and testing. *European design guide for tensile surface structures*, pp. 219-241.

Pierre NAVARO AUBURTIN

Élève ingénieur concours commun
Parcours Structure et architecture

Promotion 2020

Mission recherche réalisée à :
Laboratoire Navier, Laboratoire Kawaguchi

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Ken'Ichi KAWAGUCHI, chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Cyril DOUTHE, chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Optimisation de la précontrainte de coques

Mots-clés : autocontrainte, coque, optimisation, nombre de rigidité de Maxwell, précontrainte

Contexte

La précontrainte a été utilisée pour la première fois par Eugène Freyssinet qui a déposé un brevet en 1928. Le cadre théorique est bien connu lorsqu'il s'agit de poutres ou de dalles cependant son utilisation sur les coques dépend plus de l'expérience et du savoir des ingénieurs.

Missions et objectifs

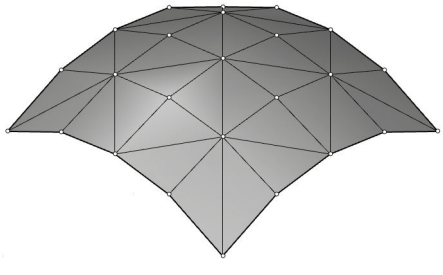
L'objectif principal de ce travail de recherche est d'optimiser la précontrainte de structure de coque en utilisant leurs modes d'autocontrainte. Cela se décline en plusieurs missions. La première est de réaliser une étude bibliographique sur la précontrainte et les coques. La seconde est de développer et vérifier le cadre théorique défini par des travaux antérieurs au mien au sein du laboratoire Kawaguchi. Enfin il s'agit d'implémenter le calcul des modes d'autocontrainte et l'optimisation en C#.

Résumé

Au cours de ce projet de fin d'étude, nous avons étudié différents aspects des coques. Tout d'abord, nous avons développé le cadre théorique pour étudier ces structures. Ces avancées sont principalement l'extension de la loi de Maxwell aux structures mixtes et des relations entre les espaces (au sens mathématique) des modes d'autocontrainte.

Ce travail nous montre à nouveau le lien entre la géométrie, la mécanique et les mathématiques. Nous observons la nécessité d'utiliser des outils algébriques pour comprendre le comportement des structures complexes. Plus spécifiquement, l'utilisation de théories telles que l'inverse de Moore-Penrose et le calcul des modes propres nous donne un aperçu du comportement des coques à travers l'étude de leurs états d'autocontrainte.

En utilisant des outils numériques, nous sommes capables de calculer les modes d'autocontrainte des coques. Cela nous donne des résultats intéressants concernant l'influence du maillage pour étudier ces structures. Plus important encore, cela nous permet d'illustrer les propriétés mathématiques des modes d'autocontrainte. Notamment, si la structure A est géométriquement incluse dans la structure B alors les modes d'autocontrainte de la structure A sont des modes d'autocontrainte de la structure B. Nous sommes également en mesure de montrer que ces modes ne sont pas nécessairement symétriques ou antisymétriques pour une structure symétrique. Enfin, une simple optimisation basée sur ces modes d'autocontrainte nous fournit une première localisation et des valeurs intéressantes pour la précontrainte qui peuvent être vérifiées à l'aide d'une matrice de contrôle de la précontrainte.



Maillage 32 faces modélisant une coque dont la surface s'appuie sur une sphère © Pierre Navaro Auburtin, 2021.

Optimization of the prestress of shell structures

Keywords: self-stress, shell, optimization, Maxwell rigidity number, prestress

Context

Prestress was first used by Eugène Freyssinet, who filed the patent in 1928. The theoretical framework is well known when it comes to beams or slabs, but its use on shells depends more on the experience and knowledge of engineers.

Missions and goals

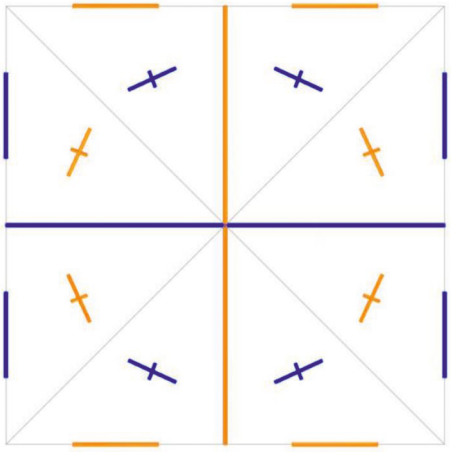
The main objective of this research is to optimize the prestress of shell structures using their self-stress modes. This task is broken down into several missions. First, we carry out a bibliographical study on prestressing and shells. Then, we develop and verify the theoretical framework defined by previous works at the Kawaguchi laboratory. Finally, we implement the calculation of the self-stressing modes and the optimization in C#.

Abstract

In this PFE, we studied different aspects of shell structures. First, we developed the theoretical framework to study these structures. Advances mainly concerned the extension of Maxwell's law to mixed structures and also concerned the relations between the spaces (in the mathematical sense) of the self-stressing modes.

Our work once again demonstrated the link between geometry, mechanics and mathematics. We observe the need to use algebraic tools to understand the behavior of complex structures. More specifically, the use of theories such as the Moore-Penrose inverse and the calculation of Eigen modes gives us insight into the behavior of shells through the study of their self-stress states.

Using numerical tools, we are able to calculate the self-stress modes of the shells. This gives us interesting results concerning the influence of the mesh on the study of these structures. More importantly, it allows us to illustrate the mathematical properties of self-stressing modes. In particular, if structure A is geometrically embedded in structure B, then the self-stressing modes of structure A are self-stressing modes of structure B. We are also able to show that these modes are not necessarily symmetric or antisymmetric for a symmetric structure. Finally, a simple optimization based on these self-stress modes provides us with a first localization and interesting values for the prestress. This solution can be checked using a prestress control matrix.



1er mode d'autocontrainte d'une coque modélisé par un maillage à 8 faces © Pierre Navaro Auburtin, 2021.

Éléments de bibliographie

CALLADINE, Christopher R., 1978. Buckminster Fuller's "tensegrity" structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames. *International journal of solids and structures*, vol. 14, n° 2, pp. 161-172.

GRISONI, Lucas, 2017. *Self-Stress State and Prestress Control of Shell Structures*. Mémoire de projet de fin d'études : Master Génie Civil et Construction, Champs-sur-Marne : École des Ponts ParisTech.

KAWAGUCHI, Ken-Ichi, HANGAI, Yasuhiko, PELLEGRINO, Sergio *et al.*, 1996. Shape and stress control analysis of prestressed truss structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, décembre 1996, vol. 15, n° 12, pp. 1226-1236.

Génie industriel

Industrial Engineering

Le département Génie Industriel a pour mission de former des ingénieurs généralistes de haut-niveau capables de résoudre des problèmes industriels complexes dans des domaines variés. Le monde contemporain est actuellement confronté à de grandes transformations (transitions écologique et numérique notamment) qui constituent autant de défis que de nouvelles opportunités pour les entreprises. D'autre part, l'émergence de nouvelles technologies (Big Data, IA, fabrication additive, réalité augmentée, IoT) permet d'imaginer de nouveaux modèles industriels permettant de répondre aux nouvelles exigences des consommateurs en matière de qualité, de réactivité, de personnalisation des produits et d'impact environnemental et social.

Il s'agit donc de former des ingénieurs et de futurs dirigeants capables d'articuler ces technologies et d'accompagner la mutation de l'industrie vers de nouvelles démarches stratégiques et pratiques opérationnelles. Ainsi, l'enjeu de la formation réside dans le développement de compétences scientifiques et techniques pour penser et concevoir des systèmes industriels alternatifs, originaux, innovants et éco-responsables.

Le Génie Industriel à l'École des Ponts ParisTech

Le Génie Industriel s'intéresse à l'amélioration, l'optimisation et la conception de systèmes industriels complexes (organisations, systèmes de production et de fabrication, usines, R&D, processus industriels, *supply chain*, logistique). Il utilise les connaissances scientifiques des mathématiques, de la physique, de l'économie, de la gestion, des sciences humaines et sociales et des méthodes de l'ingénierie. L'objectif est de spécifier, concevoir, évaluer, prédire et évaluer les résultats de ces systèmes.

Pour répondre à ces enjeux, le département propose un large choix de cours permettant aux étudiants de mieux appréhender le fonctionnement des entreprises sur de multiples dimensions. Il introduit aussi les étudiants aux grandes transformations en cours dans les systèmes industriels contemporains. Il met particulièrement l'accès sur les compétences cœurs du génie industriel : Planification et modélisation de système de production, recherche opérationnelle, management de la *supply chain*, théories et méthodes de la conception pour l'innovation, développement logiciel, outils de modélisation et de simulation, statistique numérique et analyse de données, Marketing, achat, logistique, protection de l'innovation, *Design Thinking*, stratégie et finance d'entreprise, *etc*.

Métiers

L'ingénieur des Ponts spécialisé en Génie Industriel maîtrise les concepts scientifiques et techniques fondamentaux lui permettant d'appréhender tous les enjeux des systèmes industriels complexes de la conception à la production de technologies et produits innovants en passant par l'approvisionnement et la distribution de biens et de services.

Le département forme des ingénieurs aux métier de l'industrie dans des secteurs industriels variés (luxe, automobile, aéronautique, cosmétique, énergie, pharmacie, agroalimentaire, construction, télécoms, *etc.*). Par exemple responsable *supply chain*, chef de projet en conception, responsable de production, *Data Scientist*, *etc*. Les métiers du conseil en stratégie, en organisation, en *supply chain* et en systèmes d'information constituent également une importante source de débouchés pour les étudiants.

Une Nuit pour Entreprendre © Wind my Roof – École des Ponts ParisTech.

Fabrice Bonneau
Président
Department Head

Benjamin Cabanes
Responsable académique
Academic Head

Mohamed Saâd El Harrab
Responsable académique
Academic Head

Sandrine Guillerm
Inspectrice des études
Academic Advisor

Aurélie Mortier
Assistante polyvalente
Department Assistant

The Department of Industrial Engineering aims to educate and train high-level generalist engineers able to solve complex industrial problems in various fields. The contemporary world is currently facing major transformations (ecological and digital transitions in particular) which constitute as many challenges as new opportunities for industrial organizations. Moreover, the emergence of new technologies (Big Data, AI, Additive Manufacturing, Augmented Reality, IoT) makes it possible to imagine new industrial models to meet new consumer requirements in terms of quality, responsiveness, product customization and environmental and social impact.

Therefore, the objective is to train engineers and future managers capable of articulating these technologies and accompanying the industry's transformation towards new strategic approaches and operational practices.

Thus, the challenge of the training lies in the development of scientific and technical skills to think and design alternative, original, innovative and eco-responsible industrial systems.

Industrial engineering at the École des Ponts ParisTech

Industrial Engineering concerns the design, the improvement and the optimization of complex industrial systems (organizations, production and manufacturing systems, R&D, industrial processes, supply chain, logistics). It uses scientific knowledge of mathematics, physics, economics, management, human and social sciences and engineering methods. The objective is to specify, design, evaluate, predict and evaluate the results of these systems.

To respond to these challenges, the department offers a wide range of courses that enable students to better understand the functioning of organizations on multiple dimensions. It also introduces students to the major transformations taking place in contemporary industrial systems. In particular, it focuses on the core competencies of industrial engineering: production and manufacturing, operations management, operations research, supply chain management, design engineering and innovation, software development, modelling and simulation tools, numerical statistics and data analysis, marketing, purchasing, logistics, intellectual property, design thinking, strategy and corporate finance, etc.

Job market opportunities

An École des Ponts engineer specialized in Industrial Engineering masters the fundamental scientific and technical concepts that enable him/her to grasp all the issues involved in complex industrial systems, from the design to the production of innovative technologies and products, including the supply and distribution of goods and services.

The department trains engineers in a variety of industrial sectors (luxury goods, automotive, aeronautics, cosmetics, energy, chemical industries, health services, pharmaceuticals, food processing, construction, financial services, telecoms and digital, etc.*). For example, supply chain manager, design product manager, production manager, Data Scientist. The professions of strategy, organization, supply chain and information systems consulting are also an important source of opportunities for students.*

The department offers a choice of two career paths: Engineering of operations & optimization and Engineering of design and innovation.

Signature de la chaire Supply Chain du futur, 14 février 2019
© David Delaporte/École des Ponts ParisTech.

Laboratoires et chaires

Laboratories and chairs

Laboratoires • Laboratories

CERMICS

Centre d'enseignement et de recherche en Mathématiques et calcul scientifique (équipe de recherche opérationnelle Optimisation et systèmes). Thématiques : mathématiques appliquées, calcul scientifique, modélisation, optimisation.

Research Center in Mathematics and Scientific Computing (Operational Research Team Optimization and Systems). Themes: applied mathematics, scientific computing, modeling, optimization.

LIGM, Équipe Imagine/ Imagine team

Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge. Thématiques : algorithmes et architectures pour l'analyse et la synthèse d'images ; combinatoire algébrique et calcul symbolique ; logiciels, réseaux et temps réel ; modèles et algorithmes ; signal et communication.

Gaspard Monge Computer Science Laboratory. Themes: algorithms and architectures for image analysis and synthesis; algebraic combinatorics and symbolic computation; software, networks and real time; models and algorithms; signal and communication.

LATTS

Laboratoire Techniques, territoires et sociétés. Thématiques : sciences sociales, aménagement, histoire, dialogue entre sciences sociales et technique et ingénierie, dans les entreprises comme dans les administrations. Deux grands domaines abordés : organisations productives et organisations territoriales.

Technologies, Territories, and Societies Laboratory. Themes: social sciences, spatial planning, history, dialogue between social sciences and technology and engineering, in both private sector companies and the public sector. Two major domains tackled: productive organizations and territorial organizations.

Chaires • Chairs

Chaire « Supply Chain du futur » • *Chair "Supply Chain of the future"*

L'objet de la coopération entre l'École de Ponts ParisTech, Michelin, Renault, Groupe Casino et Louis Vuitton, est de soutenir l'innovation et la recherche dans le domaine de la *supply chain*. L'enjeu est notamment d'étudier et d'analyser l'impact des nouvelles technologies (internet des objets, *Data Science*, *Blockchain*, Intelligence artificielle, fabrication additive, recherche opérationnelle stochastique) sur la supply chain du futur et la compétitivité des entreprises.

The purpose of the cooperation between École de Ponts ParisTech, Michelin, Renault, Casino and Louis Vuitton is to support innovation and research in the field of supply chain. In particular, the aim is to study and analyze the impact of new technologies (Internet of Things, Data Science, Blockchain, artificial intelligence, additive manufacturing, stochastic operations research) on the supply chain of the future and the competitiveness of companies.

Les projets de fin d'études
Final year projects

Amélioration continue & Lean Management · *Continuous Improvement & Lean Management*

LOUIS RUCHE | La méthodologie Agile est-elle un outil performant de gestion de projet de transformation ?
Is Agile methodology a powerful tool for managing supply chain transformation projects?

Data Analytics · *Data Analytics*

ANTOINE POUPART-LAFARGE | La transition numérique, un effet de levier pour le monde associatif
The use of new technologies and business tools in the associative world

Data Science · *Data Science*

SIXTINE LAURON | Enjeux technologiques et socio-éthiques de la monétisation du *Big Data*
Technology, sociology and ethics of Big Data monetization

Innovation et conception · *Innovation & design*

CÉLIA PARÉ | Financement de l'électrification rurale en Afrique de l'Ouest
Financing rural electrification in West Africa

Management de la production et des opérations · *Production and operations management*

FÉLICIE LEVINTON | Modélisation et simulation d'une ligne de métro automatique gérée par un CBTC
Modelling and simulation of an automatic metro line managed by a CBTC

Stratégie · *Strategy*

BEDIS BOUSLAMA | Culture et stratégie d'entreprise : liens et leviers de transformation
Culture and strategy: Links and levers of transformation within the organization

PAUL DELANNOY | Adapter les infrastructures aux défis modernes : le rôle des investisseurs privés
Adapting infrastructure to modern challenges : private investors' role

HÉLÈNE DO | En quoi les investisseurs peuvent-ils contribuer à la protection de la biodiversité ?
Finance & Biodiversity: To what extent can investors contribute to biodiversity protection?

JOSSELIN LE GOFF | Analyse de cycle de vie et stratégie d'entreprise
Life cycle assessment and business strategy

VINCENT PERIER | Enjeux et évolution de l'immobilier dédié à la logistique urbaine
Challenges and evolution of real estate for urban logistics

CANDICE PICHON | Google Trends comme outil de prédiction de fréquentation dans les sites culturels
Google Trends as a traffic prediction tool for cultural sites

Supply chain management · *Supply chain management*

QUENTIN CHATELAN | La gestion des nouveaux produits dans le luxe : un enjeu économique et environnemental
The management of new products in the luxury industry: an economic and environmental issue

LAURE DARMENDRAIL | L'intérêt des petits projets et comment les mener pour les transformations de Danone
The assets of small projects and how to carry them out to support Danone's transformations

Louis RUCHE

Élève ingénieur polytechnique
Parcours Opérations et optimisation

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Argon&Co

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Paul SEBELLIN, Senior Manager

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Philippe WIESER, enseignant, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

La méthodologie Agile est-elle un outil performant de gestion de projet de transformation ?

Mots-clés : *project management*, *supply chain*, Agile, transformation

Contexte

Un grand nombre d'entreprises ont décidé d'embrasser les valeurs de *lean mangement* et de la méthode Agile, notamment, dans la *supply chain*, secteur dont est issue une grande partie des clients du cabinet de conseil Argon&Co. Il est alors nécessaire de comprendre les raisons de ce choix, les risques associés et, bien évidemment, les bénéfices associés.

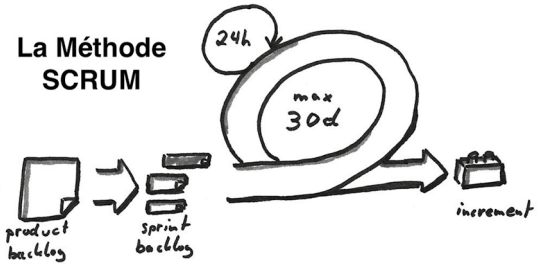
Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études (PFE) est, d'une part, de comprendre ce qui fait le succès des méthodologies Agiles, en en comparant les avantages et défauts aux méthodes traditionnelles (le cycle en V). Il s'agit, d'autre part, de présenter un projet utilisant la méthode Agile pour comparer son déroulement à ce qu'annonce la littérature et en tirer des conseils pour les entreprises intéressées par cette méthode.

Résumé

Ce PFE est construit autour d'une mission menée au sein d'Argon&Co et portant sur la transformation du flux de la *supply chain* d'un groupe de luxe à l'aide de la méthodologie Agile. Cette méthode innovante, qui ne cesse de gagner en popularité, permet de s'affranchir de certaines contraintes intrinsèques à la méthode du « cycle en V » usuellement utilisée lors de ce type de projet.

Ce projet de transformation d'un nombre important de processus de la *supply chain* – stock, approvisionnement, finance, planification, *etc.* – s'est appuyé sur l'idéologie Agile, construite autour d'un développement en courtes itérations et de retours clients réguliers grâce aux ateliers de test des nouvelles fonctionnalités, programmés à l'issue de chaque nouvelle itération. L'enjeu de ce rapport est de proposer un cadre expérimental justifiant des qualités de la méthodologie Agile. Elle permet de développer un produit au plus proche du besoin réel du client, tout en impliquant fortement l'ensemble des parties concernées par le projet, pour, ainsi, réduire la barrière au changement. D'autre part, ce rapport vise à exemplifier les limites de cette méthodologie mises en avant dans la littérature, que ce soient des problèmes de répartition de la charge de travail, de cadrage des enjeux ou d'implication vis-à-vis de la méthodologie.



Fonctionnement de la méthode SCRUM © Olivier Tacke, 2014, CC0 1.0 (source : Flickr).

Is Agile methodology a powerful tool for managing supply chain transformation projects?

Keywords: project management, supply chain, Agile, transformation

Context

Many companies have decided to embrace the values of lean management and the Agile method, particularly in the supply chain, where the majority of the clients of the Argon&Co consultancy where I did my internship are located. It is then necessary to understand the reasons for this choice, the associated risks, and of course the benefits that can be derived from it.

Missions and goals

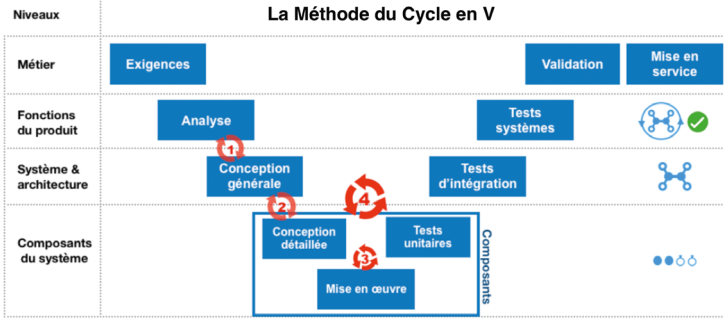
The objective of this PFE is on the one hand to understand what makes Agile methodologies successful by comparing the advantages and shortcomings of Agile and traditional methods (the V cycle). On the other hand, the objective is to present a project using the Agile method in order to compare its progress with what is established in the literature and to provide advice for companies interested in this method.

Abstract

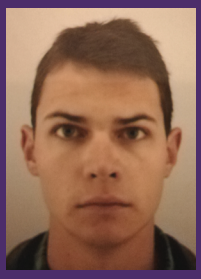
This end-of-study project is built around a mission I led at Argon&Co about the transformation of the supply chain flow of a luxury group. This transformation was carried out from start to finish using the Agile methodology. This innovative method, which continues to gain in popularity, makes it possible to free oneself from certain constraints intrinsic to the "V cycle" method normaly used for this type of project.

This project to transform supply chain processes – including stock, procurement, finance, and planning – was based on the Agile method, built around development in short iterations and regular customer feedback through workshops to test new features, scheduled at the end of each new iteration.

The aim of this report is to propose an experimental framework that will allow, on the one hand, to justify the qualities of the Agile methodology, which allows the development of a product that is as close as possible to the real needs of the client while strongly involving all the parties concerned by the project, thus reducing the barrier to change. On the other hand, this report aims at demonstrating the limits of the Agile methodology as highlighted in the literature, whether they are problems that concern workload distribution, the framing of the issues, or involvement with the methodology.



Fonctionnement du Cycle en V © Cth027 2019, CC-BY-SA 4.0 (source : Wikimedia Commons).



Antoine POUPART-LAFARGE

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Association Notre-Dame de Montligeon

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Vincent ARRECKX, secrétaire général

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Benjamin CABANES, responsable académique, département Génie civil, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

La transition numérique, un effet de levier pour le monde associatif

Mots-clés : secteur associatif, base de données, communication, RGPD

Contexte

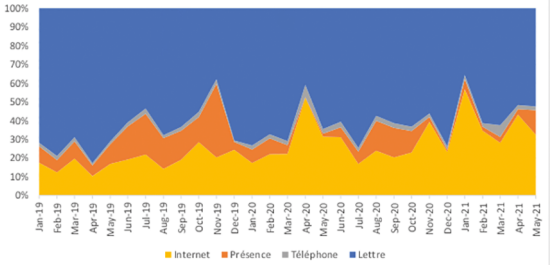
J'ai réalisé ce projet de fin d'études (PFE) dans le cadre de ma formation d'ingénieur en génie industriel à l'École des Ponts ParisTech. Il m'a permis d'assumer des missions transverses, malgré un aspect technique très marqué, dans la gestion des bases de données, tout en me donnant l'opportunité de découvrir le secteur associatif.

Missions et objectifs

- Audit du CRM Donateur, recommandation d'*upgrades* et suivi de la mise en place des améliorations ;
- Établissement du cahier des charges et consultation d'agences de *fundraising* pour l'organisation d'une prochaine levée de fonds significative (> 5 M€) visant à financer les travaux de rénovation de la Basilique Notre-Dame de Montligeon (site le plus visité de l'Orne) ;
- Mission de conseil au service communication dans l'optimisation de l'offre digitale de l'association ;
- *Benchmark* des loyers actuels et futurs des Ateliers Buguet, village d'artisans, hébergés par l'association, après de multiples rencontres avec des agences immobilières, notaires et représentants de la Chambre de commerce et d'industrie ;
- Suivi et animation des artisans locataires des Ateliers Buguet ;
- Missions diverses auprès des opérationnels du sanctuaire (*upgrade* du logiciel d'hôtellerie, support IT lors des campagnes de levées de fonds auprès du secrétariat de l'association, mise en place de la boutique en ligne, *etc.*)

Résumé

Ce mémoire de fin d'études traite, à partir de l'exemple de l'association Notre-Dame de Montligeon, des différentes opportunités qui ont émergé ces dernières années pour la collecte de fonds. La pression financière et morale sur les associations étant de plus en plus forte, celles-ci ont dû se réorganiser et innover. En exploitant la base de données des donateurs et en développant des techniques de communication innovantes, l'association Notre-Dame de Montligeon a pu maintenir les revenus nécessaires à son bon fonctionnement. Par ailleurs, le développement de ces nouvelles techniques, concomitant avec la sortie des nouvelles normes RGPD (règlementation générale sur la protection des données), incite les associations à faire preuve de toujours plus d'exigence.



Répartition des dons par vecteur de dons
© Antoine Poupart-Lafarge, 2021.

The use of new technologies and business tools in the associative world

Keywords: non-profit sector, database, communication, RGPD

Context

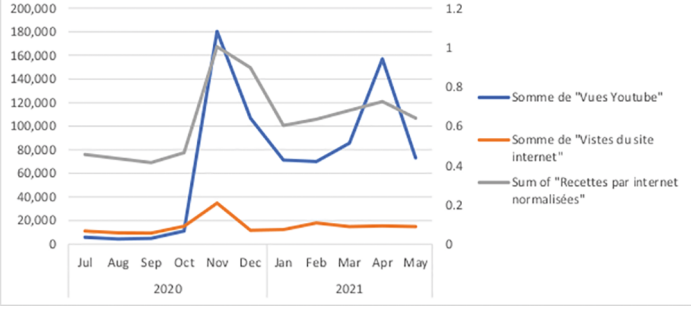
This project was realized at the end of my studies in industrial engineering at école des Ponts. I chose this internship because it allowed me a very transversal role with a technical aspect focused on the management of databases. In addition, this internship gave me the opportunity to discover the associative sector.

Missions and goals

- *Audit of the Donor CRM, recommendation of upgrades, and follow-up on the implementation of improvements.*
- *Establishment of specifications and consultation of fundraising agencies for the organization of an upcoming round of significant fundraising (>5 M€) aiming to finance the renovation of the Basilica of ND de Montligeon (the most visited site in the Orne).*
- *Consulting the Communication department in the optimization of the Association's digital offerings.*
- *Benchmarking the current and future rents of the Ateliers Buguet, a village of craftsmen hosted by the Association, involving multiple meetings with real estate agencies, notaries, and representatives of the local CCI.*
- *Follow-up and animation of the craftsmen tenants of the Ateliers Buguet.*
- *Various missions with the sanctuary's operational staff (upgrade of the hotel software, IT support for the Association's secretariat during fundraising campaigns, setting up the online store, etc.)*

Abstract

This thesis deals with the different fundraising opportunities that have emerged in recent years, using the example of the Notre Dame de Montligeon Association. As financial and moral pressure on associations has increased, they have had to reorganize and innovate. By exploiting its database of donors and developing innovative communication techniques, the Notre-Dame de Montligeon Association has been able to maintain the income necessary for its proper functioning. Moreover, the development of these new techniques, concomitant with the release of the new RGPD norms, encourages associations to be ever more rigorous.



Évolution de la communication internet de l'association © Antoine Poupart-Lafarge, 2021.

Sixtine LAURON

Élève ingénieure concours commun
Master of Engineering in Operations Research, University of California Berkeley (États-Unis)

Promotion 2020

Mission recherche réalisée à :
University of California Berkeley, Graduate Department of Industrial Engineering

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Ken GOLDBERG, Database management systems graduate Professor

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Benjamin CABANES, responsable académique, département Génie civil, École des Ponts ParisTech

Enjeux technologiques et socio-éthiques de la monétisation du Big Data

Mots-clés : *Big Data*, Intelligence artificielle, biais algorithmique, éthique des *Data Sciences*, GAFAM

Contexte

Pour mon deuxième semestre à l'UC Berkeley en 2021, j'ai été engagée par l'Université en tant qu'assistante d'enseignement pour un cours de Master/PhD sur les systèmes de gestion de bases de données et leurs applications industrielles et commerciales. J'ai travaillé en collaboration avec le professeur Ken Goldberg (PhD), chercheur américain en robotique et en automatisation, professeur à l'UC Berkeley, afin d'élaborer et d'enseigner des laboratoires d'algèbre relationnelle et de programmation en Python, MySQL et NoSQL pour initier les élèves à la stratégie de gestion des bases de données.

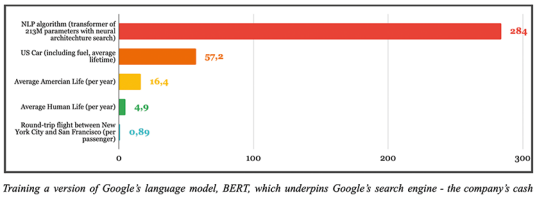
Missions et objectifs

Mon poste d'assistante d'enseignement m'a incitée à étudier les enjeux de la monétisation du *Big Data* sous deux angles différents : une approche technique, afin de comprendre l'environnement complexe de la gestion des bases de données actuelles, et l'aspect bioéthique, afin de comprendre ce que les sciences sociales et l'éthique peuvent nous apprendre quant à notre responsabilité vis-à-vis de l'avenir de nos sociétés digitales, et de quels outils nous disposons pour atténuer les inégalités socio-économiques que la *data science* fait émerger.

Résumé

Depuis ses premières théorisations en 1940, le *Machine Learning* n'a cessé de déployer sa puissance dans notre société toujours plus en demande d'automatisation. De la justice à la santé, de la *supply chain* au commerce en ligne, tous les secteurs d'activité sont désormais séduits par les promesses économiques de la monétisation du *Big Data*. Si la collecte et le stockage efficace de ces quantités énormes de données ont un potentiel non négligeable dans l'amélioration du service client et l'innovation des *business models*, l'écosystème numérique reste néanmoins un espace de plus en plus compétitif, controversé et volatile.

Aujourd'hui, le débat mondial sur l'IA et ses biais algorithmiques est mitigé. Quelques ingénieurs lanceurs d'alerte isolés s'opposent aux campagnes de communication très génériques et abstraites sur les "*IA principles*" des *leaders* de l'industrie technologique, plus animés par la volonté d'assurer leur performance face à l'implacable concurrence mondiale. Le résultat est immédiat : trop peu d'actions concrètes sont menées pour redonner à la *data science* sa vocation originale d'objectivité et d'équité sociale. Comment la nouvelle génération de *data scientists*, une communauté scientifique qui reste aujourd'hui majoritairement caucasienne et masculine, peut-elle donc garantir l'équité et la justice sociale de la digitalisation de l'ensemble de la planète ?



Training a version of Google's language model, BERT, which underpins Google's search engine - the company's cash cow - produces the same amount of CO2 as a round-trip flight of 315 passengers between San Francisco and New York City. These are minimum estimated numbers, as they represent the cost of training a model only once : in practice, models are trained and retrained many times over during research and development. Source : Google AI Ethics.

The environmental cost of Artificial Intelligence: Carbon Footprint Benchmark, in tons of CO_2 per year © Sixtine Lauron, 2021.

Technology, sociology and ethics of Big Data monetization

Keywords: Big Data, Artificial Intelligence, algorithmic bias, Data Science ethics

Context

For my Spring semester at UC Berkeley in 2021, I was hired by the University as a teaching assistant for a Master/PhD course on database management systems and their industrial and commercial applications. I worked in collaboration with Professor Ken Goldberg (PhD), an American robotics and automation researcher and professor at UC Berkeley, to develop and teach relational algebra and programming labs in Python, MySQL, and NoSQL to introduce students to database management strategy.

Missions and goals

My position as a teaching assistant at UC Berkeley inspired me to study the issues of Big Data monetization from two different perspectives: the first technical, so as to understand the complex environment of commercial databases management, and the second bioethical, to understand what sociology and ethics can teach us engineers about our responsibility towards the future of our digital societies, and what tools we have at hand to alleviate the socio-economic inequalities that data science has recently brought forth.

Abstract

Since its first implementation in the 1940s, Machine Learning has continuously unleashed its power throughout our digitized society: from justice and healthcare to supply chain and online shopping, the number of use cases is exponential. This promising yet still poorly regulated AI field has been pushed to the forefront of our business world in recent years, partly owing to the advent and global monetization of Big Data. While the collection and efficient storage of these huge amounts of available data represent a great potential for customer service improvement and business model innovation, the digital ecosystem remains an increasingly competitive, controversial, and extremely volatile space.

Today, the global AI discussion is mitigated: between the few isolated whistleblowing engineers and the very generic AI ethics communication campaigns from the tech industry leaders, rather driven by their will to be ever more efficient against the relentless global competition, too little concrete action is being taken to give back to data science its original hunger for more objectivity and equity. Solutions are starting to be identified, but in our complex world shaped by a worrying environmental future, it all comes at a cost.

Éléments de bibliographie

BENDER, Emily M., GEBRU, Timnit, MCMILLAN-MAJOR, Angelina *et al.*, 2021. On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big?. *In: Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. New York : Association for Computing Machinery, pp. 610-623.

LOVELUCK, Benjamin, 2015. *Réseaux, libertés et contrôles : une généalogie politique d'Internet.* Paris : Armand Colin, 368 p.

KANTAYYA, Shalini, 2020. *Coded Bias*, 7th empire media.

Célia PARÉ

Élève ingénieure double diplôme
Polytechnique Montréal, Canada

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Meridiam West Africa

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Mete SARACOGLU, Senior VP development for West Africa

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Alon ROZEN, doyen de la Business School, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 5 ans - Confidential

Financement de l'électrification rurale en Afrique de l'Ouest

Mots-clés : électrification rurale, microfinance, Afrique de l'Ouest, valeur partagée, énergie renouvelable

Contexte

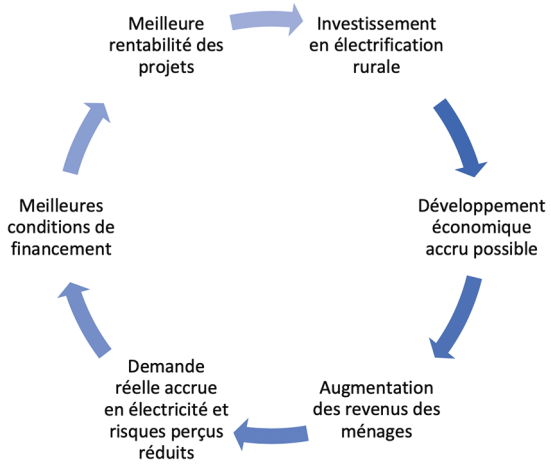
L'électrification rurale en Afrique reste un enjeu majeur pour le développement économique du continent. Les acteurs publics et privés se doivent d'innover et de collaborer pour subvenir aux besoins énergétiques d'une population en rapide croissance malgré des contraintes financières importantes.

Missions et objectifs

Ce projet a pour objectif d'analyser les freins au développement de projets d'électrification rurale avec un focus sur les technologies utilisant le solaire. Un portrait du secteur de l'énergie en Afrique de l'Ouest est également dressé afin de poser le cadre dans lequel des pistes de solutions sont apportées. Le but est de rendre ces propositions accessibles aux investisseurs privés travaillant dans ce secteur et qu'elles agissent à différents niveaux d'un cercle vertueux de développement.

Résumé

Ce mémoire porte sur les activités de financement de l'électrification rurale en Afrique de l'Ouest de Meridiam. Ce fonds d'investissement privé développe et gère plusieurs projets solaires dans la région dont les principaux enjeux ont pu être analysés au cours d'un stage de 6 mois dans les bureaux de Dakar. Dans le secteur, bien que le besoin soit présent, le risque de non-paiement des usagers reste un frein important, et l'obtention de financement (subvention, dette) est difficile. D'où la nécessité de coupler l'électrification à la création d'activités économiques afin de créer un cercle vertueux : mise à disposition de la ressource, utilisation de la ressource par des acteurs stables (industriels, économiques, *etc.*), financement accru. Les investisseurs privés comme Meridiam peuvent injecter des fonds et mettre à disposition l'électricité. Mais il faut un contexte économique stable pour que l'impact soit durable. C'est pourquoi, il est indispensable d'évaluer des pistes de financement alternatives et de création de richesse, notamment, par le biais des institutions de microfinance. Un tel partenariat pourrait multiplier l'impact de l'investissement initial par la création de valeur partagée.



Cercle vertueux de l'électrification en Afrique rurale © Célia Paré, 2021.

Financing rural electrification in West Africa

Keywords: rural electrification, microfinance, West Africa, shared value, renewable energy

Context

Rural electrification in Africa remains a major challenge for the economic development of the continent. Public and private actors must innovate and collaborate to meet the energy needs of a rapidly growing population despite significant financial constraints.

Missions and goals

This project aims to analyze the factors that hold back rural electrification projects with a focus on solar energy technologies. An overview of the energy sector in West Africa is also presented in order to provide a framework in which some solutions are considered. The aim is for these proposals to be at the disposal of private investors working in this sector and to have impact at different steps of a virtuous circle of development.

Abstract

This thesis focuses on the financing activities of Meridiam for rural electrification in West Africa. This private investment fund develops and manages several solar projects in the region, the main issues of which were analyzed during a 6-month internship at the Dakar office. Although the need is present in the sector, the revenue risk remains a major obstacle, and securing financing (subsidies, loans) is difficult. Hence the need to combine electrification with the generation of economic activities in order to create a virtuous circle of making the resource available, having it used by stable actors (industrial, economic, etc.*), and increasing funding. Private investors like Meridiam can inject funds and make electricity available, but it takes a stable economic environment to provide a long-lasting impact. It is essential to assess alternative financing and wealth creation solutions alongside microfinance institutions. Such partnerships could multiply the impact of the initial investment by creating shared value.*

Félicie LEVINTON

Élève ingénieure concours commun
Parcours Conception et innovation

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Egis Rail

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Isabel BRUFAU, expert

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Nadir FARHI, enseignant, université Gustave Eiffel

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 10 ans - Confidential

Modélisation et simulation d'une ligne de métro automatique gérée par un CBTC

Mots-clés : CBTC, exploitation, métro, ferroviaire, transports

Contexte

Pour augmenter la capacité et la fiabilité d'une ligne de métro tout en préservant la sécurité des voyageurs, un système de contrôle automatique des trains a été créé : le CBTC. Il est basé sur la communication continue entre les trains et des ordinateurs chargés de piloter les circulations. Il repose, en général, sur du canton mobile déformable dans sa gestion de l'espacement entre les trains. Certaines lignes de métro, en manque de capacité, ont été équipées d'un CBTC *a posteriori*, comme la ligne 1 parisienne. D'autres en sont équipées dès leur conception. C'est notamment le cas de la ligne 14 à Paris. Dans le cadre du Grand Paris Express, de nouvelles lignes de métro équipées de CBTC sont en projet. Les études amont sont nécessaires pour des études d'exploitation de ces futures lignes.

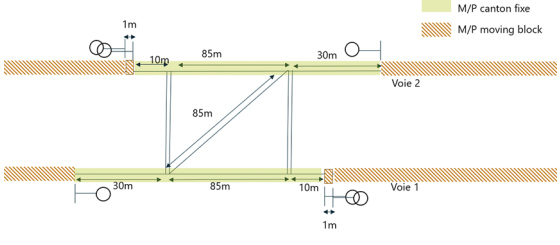
Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études (PFE) vise à vérifier certaines exigences liées à l'exploitation imposée par la Société du Grand Paris. Elles portent sur les temps de parcours intergares, qui doivent être calculés avec le logiciel de simulation ferroviaire Railsys. Celui-ci est ensuite soumis à deux tests de robustesse. Railsys est un logiciel développé pour le ferroviaire et non pour le métro. Il n'existe pas de comportement « CBTC défini » dans Railsys. L'enjeu de ce projet est donc de proposer une modélisation pertinente d'un CBTC avec les fonctionnalités disponibles de Railsys.

Résumé

Les systèmes de transport sur rail reposent sur des infrastructures importantes, tels que des ouvrages de génie civil, de géotechnique, des installations électriques, *etc*. Les contraintes liées aux infrastructures nécessaires à la circulation des trains sont telles, que l'on cherche aujourd'hui à en optimiser leur utilisation et à en maximiser la capacité. Une façon d'augmenter la capacité d'une ligne de métro passe par l'exploitation, c'est-à-dire la gestion des circulations tout en tenant compte des contraintes d'infrastructure et de sécurité, ainsi que des ressources. L'exploitation doit notamment définir un mode de signalisation et un système de contrôle des trains. Le projet du Grand Paris Express prévoit d'équiper ses futures lignes de métro d'un CBTC.

Dans ce projet de fin d'études, nous nous intéressons à la modélisation et à la simulation d'un comportement de CBTC sur le logiciel de simulation ferroviaire Railsys, appliqué au tronçon Est-Sud de la ligne 15 du Grand Paris Express.



Signalisation d'une zone d'itinéraires modélisée en canton fixe
© Félicie Levinton, 2022.

Modelling and simulation of an automatic metro line managed by a CBTC

Keywords: transport, CBTC, subway, railway, train

Context

To increase the capacity and reliability of a metro line while maintaining passenger safety, an automatic train control system has been created: the CBTC. It is based on continuous communication between the trains and the computers responsible for controlling the traffic. It is generally based on deformable mobile blocks in its management of the spacing between trains.

Some metro lines, lacking capacity, have been equipped with CBTC after the fact, such as line 1 in Paris. Others are planned to be equipped with CBTC from the outset, such as line 14 in Paris.

In the context of the Grand Paris Express, new metro lines equipped with CBTC are planned. Upstream studies are required in particular for the operation of these future lines.

Missions and goals

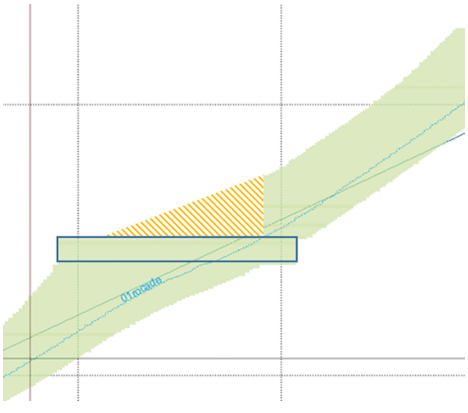
In the framework of this PFE, we seek to verify certain operation requirements imposed by the Société du Grand Paris. Firstly, the requirements concern inter-station travel times. These times must be calculated with the railway simulation software "Railsys". Secondly, two robustness tests are to be carried out with the Railsys software. However, Railsys is a software developed for railways and not for the metro. There is no "CBTC defined" behaviour in Railsys. It is therefore the challenge of our project to propose a relevant modelling of CBTC with the available functionalities of Railsys.

Abstract

Rail transport systems rely on important infrastructures such as civil engineering works, geotechnical works, electrical installations, etc. The constraints linked to the infrastructures necessary for the circulation of trains are such that we are now seeking to optimise their use and maximise their capacity.

One way of increasing the capacity of a metro line is through operations, i.e., the management of traffic while taking account of infrastructure and safety constraints as well as resources. In particular, operations must define a signalling mode and a train control system. The Grand Paris Express project plans to equip its future metro lines with a CBTC.

In this end-of-studies project, we are interested in the modelling and simulation of CBTC behaviour on the railway simulation software Railsys, applied to the East-South section of line 15 of the Grand Paris Express.



Graphique espace temps de l'occupation attendue d'un CBTC en zone d'itinéraires © Félicie Levinton, 2022.

Bedis BOUSLAMA

Élève ingénieur double diplôme
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), Tunisie

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Kea & Partners

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Étienne DENIS, directeur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Ewa GALLOU, enseignante, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Culture et stratégie d'entreprise : liens et leviers de transformation

Mots-clés : culture, stratégie, transformation, performance

Contexte

Ce projet de fin d'études (PFE) s'inscrit dans le cadre d'un stage de consultant junior réalisé chez Kea & Partners, acteurs incontournables et experts dans les sujets de stratégie et de culture d'organisation. Il représente une véritable opportunité d'immersion dans les projets clients autour de cette thématique.

Missions et objectifs

- Participer à l'identification des enjeux du client, à la compréhension par l'équipe de l'environnement du projet, au cadrage de la démarche à adopter pour résoudre le problème posé
- Contribuer à la structuration des travaux et analyses à réaliser
- Structurer, organiser et réaliser les travaux de recherche, de collecte et d'analyse de l'information
- Contribuer activement à la construction de la relation avec le client et ses équipes
- Participer à la préparation et à la réalisation d'entretiens de compréhension du contexte, de collecte et d'approfondissement de l'information
- Contribuer à la préparation et à l'animation des réunions avec le client et ses équipes
- Réaliser les travaux d'analyse nécessaires et en formaliser les résultats
- Structurer et formaliser des documents de présentation au client
- Participer au sein de l'équipe projet à la conception des propositions de solutions
- Contribuer directement ou indirectement à la présentation des résultats au client

Résumé

Dans un monde VUCA qui requiert des entreprises d'être plus anticipatrices, agiles, aspirationnelles et authentiques, la culture se positionne aujourd'hui au centre des agendas des dirigeants d'entreprises. Bien que la culture soit un concept vivant et complexe à appréhender, c'est avant tout un vecteur de performance et un avantage compétitif pour l'entreprise et qui, comme tout autre levier de transformation, s'explore et se mesure.

Tout dirigeant d'entreprise est amené à concilier quotidiennement la conception d'une stratégie innovante et le développement d'une culture forte qui rend l'entreprise performante, en l'amenant à devenir résiliente, apprenante et durable. Ces deux exercices ne peuvent aboutir que s'ils sont réalisés conjointement. Il n'y a pas de transformation stratégique sans transformation culturelle. Pourtant, ils suivent tous les deux la même démarche : définition d'une orientation générale, déclinaison en intentions et initiatives actionnables, déploiement et suivi par le biais d'indicateurs adaptés.

Récapitulatif de la démarche © Kea & Partners, 2021.

Culture and strategy: Links and levers of transformation within the organization

Keywords: culture, strategy, transformation, performance

Context

This end-of-studies project is part of my internship at Kea & Partners as a junior consultant. Kea being one of the proven experts in the organization's strategy and culture field, this internship was a first complete immersion in client's projects around this theme.

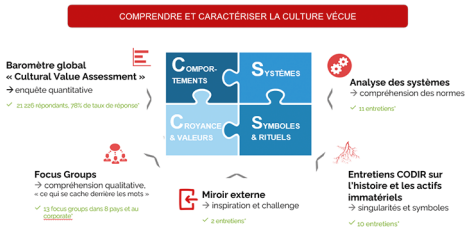
Missions and goals

- *Participating in the identification of the client's issues and the team's understanding of the project environment.*
- *Participating in framing the approach adopted to solve the problem.*
- *Contributing to the structuring of the work and analyses to be carried out.*
- *Structuring, organizing, and carrying out out research, information gathering, and analysis.*
- *Contributing to building the relationship with the client and his teams: listening, availability, empathy, sense of client service, conveying Kea & Partners' image.*
- *Participating in the preparation and conduct of interviews to establish context and collect information; subsequent creation of an interview guide and a conduct*
- *Guide, writing of reports.*
- *Contributing to the preparation and animation of meetings with the client and his teams.*
- *Carrying out analysis work and formalizing the results.*
- *Structuring and formalizing presentation documents for the client.*
- *Participating in the design of solution proposals within the project team.*
- *Contributing directly and indirectly to the presentation of results to the client.*
- *Delivering work on time, contributing to priority management.*

Abstract

In a VUCA world that requires more forward-looking, agile, aspirational and authentic businesses, culture is nowadays at the center of business leaders' agednas. Although culture is a living concept and complex to apprehend, it is above all a driver of performance, a competitive advantage, and, like any other lever of transformation, can be explored and measured.

Every business manager must reconcile on a day-to-day basis the design of an innovative strategy and the development of a strong culture that makes his company resilient, learning, and sustainable. These two exercises can only be successful if they are carried out jointly. There is no strategic transformation without cultural transformation, and they both follow the same process: definition of a general orientation, sorting it through intentions and actionable initiatives, deployment, and then monitoring using appropriate indicators.



Briques du diagnostic culturel © Kea & Partners, 2021.

Éléments de bibliographie

BARRETT, Richard, 2013. *Building a values-driven organization*. Burlington, Oxford : Butterworth-Heinemann, Elsevier, 276 p.

Paul DELANNOY

Élève ingénieur concours commun
Master of Finance, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, États-Unis

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Ardian

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Edouard BERTAGNA, Investment Manager

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Clive GALLERY, responsable de module, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Adapter les infrastructures aux défis modernes : le rôle des investisseurs privés

Mots-clés : infrastructure, investisseur privé, financement, transition, innovation

Contexte

Après un double diplôme avec le Master of Finance du MIT, j'ai décidé de m'orienter vers un fonds d'investissement en infrastructure pour appliquer les connaissances financières dans des actifs stratégiques pour la transition énergétique et digitale.

Missions et objectifs

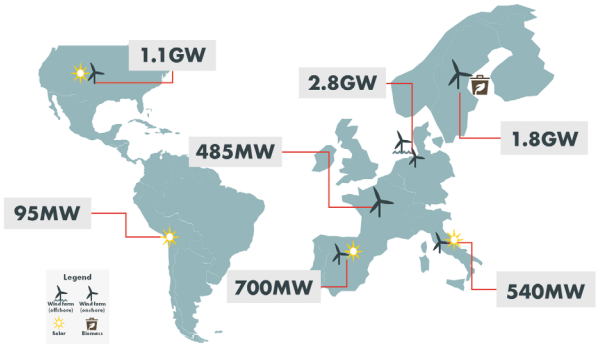
- Assistance aux directeurs d'investissement lors de nouvelles transactions (acquisitions de sociétés)
- Construction de modèles financiers de valorisation d'entreprises : prévisions, optimisation de la structure financière, études de sensibilité par actif ou sur portefeuille
- Préparation de synthèses de valorisation présentées à l'ensemble de l'équipe
- *Asset Management* / Gestion d'actifs
- Analyse de nouveaux périmètres d'investissement

Résumé

Les infrastructures sont des ouvrages critiques pour le développement économique d'une société. Si l'État intervient pour les réguler, il fait souvent appel au secteur privé pour l'aider à financer leur développement.

La nature stratégique des infrastructures requiert de les adapter aux défis énergétiques et digitaux contemporains. Les investisseurs privés financent de nouvelles infrastructures et permettent la transition énergétique et digitale des infrastructures existantes. Leur rôle ne se limite pas à l'apport de capital. Dans le cadre des transitions énergétiques et digitales en particulier, les fonds d'investissement sont très efficaces pour établir des plans de transition, utiliser et sélectionner les nouvelles technologies. Ils sont aussi très importants pour lever des fonds auprès d'investisseurs institutionnels pour financer des infrastructures modernes.

À travers le rôle de plateforme d'investissement et d'accompagnement d'entreprise, nous explorons ici la manière dont les investisseurs privés peuvent aider les infrastructures à s'adapter aux défis modernes grâce à l'exemple d'Ardian Infrastructure.



Portefeuille renouvelable d'Ardian Infrastructure © Paul Delannoy, 2021.

Adapting infrastructure to modern challenges : private investors' role

Keywords: infrastructure, private investor, financing, transition, innovation

Context

After my dual degree involving MIT's Master of Finance, I decided to work at an infrastructure investment fund to apply my financial knowledge in strategic assets for energy and digital transition.

Missions and goals

- *Assistance to investment managers in new transactions (company acquisitions);*
- *Construction of financial models for the valuation of companies: forecasts, optimization of the financial structure, sensitivity studies by asset or by portfolio;*
- *Preparation of valuation summaries presented to the entire team;*
- *Asset Management;*
- *Analysis of new investment perimeters.*

Abstract

Infrastructure is critical to the economic development of a society. The state intervenes to regulate infrastructure, but often calls on the private sector to help finance its development. The strategic nature of infrastructure requires adapting it to the energy and digital challenges we face today. Private investors finance new infrastructure and enable the energy and digital transition of existing infrastructure. Their role is not limited to providing capital. In the context of energy and digital transitions, investment funds are very effective in establishing transition plans, using and selecting new technologies, and finally, finding funds to finance these projects. Through the role of investment platform and business support, and using the example of Ardian Infrastructure, we explore here how private investors can help infrastructure adapt to modern challenges.

Exemple de champs d'éoliennes © Pixabay, 2017, CC0 (source : Pexels).

Hélène DO

Élève ingénieure concours commun

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Generali Insurance Asset Management

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Alan HALLEZ, ESG Advisory Lead Manager

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Julie EVAIN, enseignante, Institut for Climate Economics (I4CE)

École des Ponts ParisTech

En quoi les investisseurs peuvent-ils contribuer à la protection de la biodiversité ?

Mots-clés : biodiversité, capital naturel, ESG, extra-financier.ière, investissement

Contexte

Dans le cadre de mon stage de fin d'études, j'ai intégré la société de gestion Generali Insurance Asset Management en tant que stagiaire-analyste ESG. Compte tenu de l'intérêt croissant des clients et des investisseurs, mais aussi des régulateurs, pour l'intégration des critères ESG dans les processus d'investissement, cette activité a impliqué des interactions avec différentes parties prenantes (les gestionnaires de portefeuille, la recherche crédit/*equity*/macro, les ventes et le marketing, les clients).

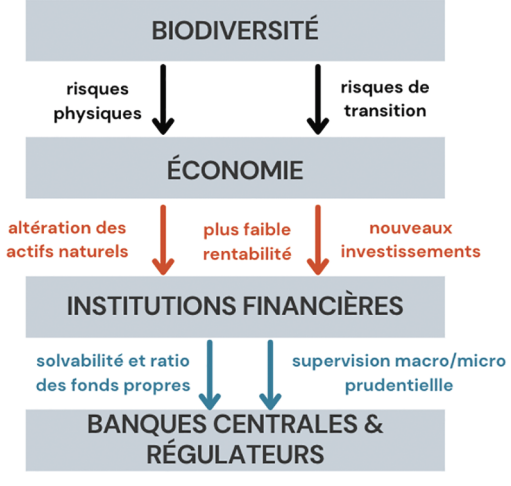
Missions et objectifs

J'ai intégré l'équipe ESG Integration & Solutions en tant que stagiaire-analyste ESG. L'équipe ESG se concentre sur l'évaluation de la responsabilité sociale des entreprises afin d'identifier les risques et opportunités ESG auxquels elles sont exposées.

Résumé

Selon le dernier rapport de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), « la nature décline à un rythme sans précédent dans l'histoire humaine ». La lutte contre la destruction de la biodiversité est un défi urgent, qui concerne tous les acteurs économiques. La dépendance des activités humaines aux divers écosystèmes n'est plus à prouver – approvisionnement en matières premières, exploitation des sols et des océans, *etc.*, de même que les impacts des activités économiques sur l'état de la nature – déforestation, artificialisation des sols, changement climatique *etc.* La perte de la biodiversité met en danger les populations, les gouvernements, les entreprises qui en dépendent et, indirectement, les investisseurs. Ces derniers ont un rôle important à jouer pour lutter contre la dégradation de la biodiversité en intégrant ces considérations dans leurs décisions d'investissement.

Ce rapport s'intéresse au rôle des investisseurs face aux challenges de la biodiversité. Il explore les risques financiers liés au capital naturel auxquels ils sont exposés ainsi que les moyens de les identifier, les stratégies à adopter, les initiatives concrètes susceptibles d'être mises en place.



Relations entre le secteur financier et la biodiversité © Hélène Do, 2022.

Finance & Biodiversity: To what extent can investors contribute to biodiversity protection?

Keywords: biodiversity, biodiversity-related risk, ESG, extra-financial, natural capital, investment

Context

As part of my final year internship, I joined Generali Insurance Asset Management as an intern ESG analyst. Given the growing interest of clients and investors, but also of regulators, in the integration of ESG criteria in the investment process, this activity involved interactions with different stakeholders (portfolio managers, credit/equity/macro research, sales and marketing, clients).

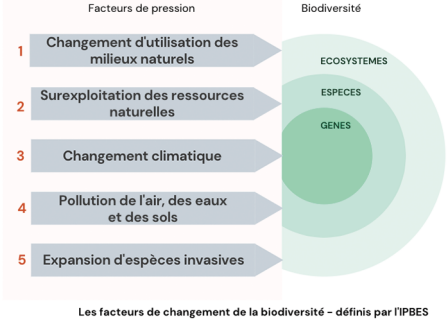
Missions and goals

I joined the ESG Integration & Solutions team as an intern ESG analyst. The ESG team focuses on assessing the corporate social responsibility of companies in order to identify the ESG risks and opportunities to which they are exposed.

Abstract

As highlighted in the latest report from the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), "Biodiversity – the diversity within species, between species and ecosystems – is declining faster than at any time in human history". Biodiversity loss raises urgent challenges which involve a range of diverse economic players. Nowadays, human activities are dependent on natural capital as well as impacting the state of nature itself. The vicious relationships between biodiversity and economic activities directly affect populations, governments, and companies. Indirectly, therefore, they also affects investors.

This report focuses on the role of investors in addressing biodiversity-related issues in their environmental decision-making processes. It aims at uncovering the linkages between natural capital and financial risks, identifying investors' exposure to biodiversity loss and exploring best practices, biodiversity-related strategies, and concrete initiatives by investors.



Les facteurs de pression de la perte de biodiversité
© Hélène Do, 2022.

Éléments de bibliographie

DÍAZ, Sandra M., SETTELE, Josef, BRONDÍZIO, Eduardo S. *et al.*, 2019. *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Summary for policymakers* [en ligne]. Bonn : IPBS secretariat, 1 148 p. DOI: 10.5281/zenodo.3831673.

HERWEIJER, Celine, EVISON, Will, MARIAM, Samra *et al.*, 2020. *Nature Risk Rising: Why the Crisis Engulfing Nature Matters for Business and Economy* [en ligne]. Genève : World Economic Forum, PwC, 36 p. New Nature Economy series. Disponible sur : https://www3.weforum.org/docs/WEF_New_Nature_Economy_Report_2020.pdf (consulté le 15.11.2021).

KHATRI, Akanksha, ALBANI, Marco, THOMPSON, Fraser *et al.*, 2020. *The Future of Nature and Business. New Nature Economy Report II*. Genève : World Economic Forum, AlphaBeta, 111 p. Disponible sur : https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Future_Of_Nature_And_Business_2020.pdf (consulté le 15.11.2021).

Josselin LE GOFF

Élève ingénieur concours commun
Parcours Écoconception

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Gingko 21

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Hélène TEULON, fondatrice

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Adélaïde FERAILLE, chercheuse, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 10 ans - Confidential

Analyse de cycle de vie et stratégie d'entreprise

Mots-clés : analyse de cycle de vie, pédagogie, impact environnemental

Contexte

La prise en compte de l'enjeu climatique est de plus en plus présente dans les stratégies d'entreprises. Néanmoins, la contribution au changement climatique n'est pas le seul impact environnemental que peut avoir une entreprise. Afin d'éviter les transferts de pollution d'un impact environnemental à l'autre ou d'une organisation à une autre, il est donc pertinent de mesurer les impacts environnementaux tout au long de la chaîne valeur.

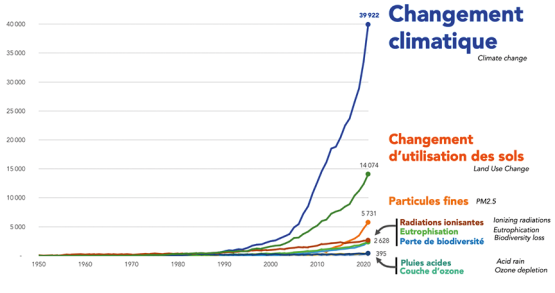
Missions et objectifs

Alors que la méthodologie de l'analyse de cycle de vie appliquée aux organisations existe déjà et fait l'objet de la norme expérimentale ISO 14072, ce mémoire s'intéresse non aux défis techniques posés par la méthodologie, mais plutôt au défi pédagogique que représente la bonne transmission des résultats d'une analyse de cycle de vie à un public non expert.

Résumé

L'analyse de cycle de vie est une méthode de mesure scientifique initialement conçue pour évaluer des impacts environnementaux d'un produit ou d'un service, sur une unité fonctionnelle donnée. Elle peut ainsi servir de référence pour communiquer sur la performance environnementale des produits, ou aider à la décision lors de la phase de conception par exemple. La norme ISO 14072 explique comment réaliser une analyse de cycle de vie pour toute une organisation.

La transmission des résultats est une étape cruciale dans une mission d'analyse de cycle de vie car elle détermine, en partie, la valeur que va attribuer le client aux résultats qui lui sont présentés et, de fait, va l'inciter, ou non, à donner suite à cette étude. Ce mémoire s'intéresse donc aux différentes façons de présenter les résultats d'une analyse de cycle de vie et formule des recommandations pour en faciliter la compréhension et l'utilisation ultérieure par le client. Dans le même objectif, ce projet de fin d'études a donné lieu à la réalisation d'un support pédagogique expliquant de façon simple et illustrée les impacts environnementaux utilisés dans la méthode Environnemental Footprint 3.0 recommandée par la Commission européenne.



Évolution du nombre de documents publiés par année et par thème sur Scopus © Josselin Le Goff, 2022.

Life cycle assessment and business strategy

Keywords: life cycle assessment, teaching, environmental impacts

Context

Climate issues are receiving increasing consideration in corporate strategies. However, a response to climate change is not the only environmental impact that a company can have. In order to avoid transferring pollution from one environmental impact to another, or from one organization to another, it is therefore relevant to measure environmental impacts throughout the entire value chain.

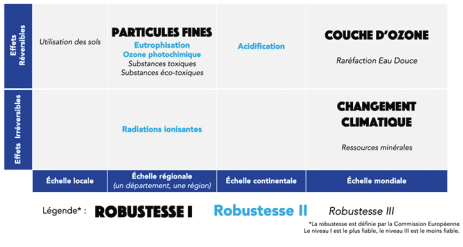
Missions and goals

While the methodology of life cycle assessment applied to organizations already exists and is the subject of the experimental ISO 14072 standard, this paper focuses not on the technical challenges posed by the methodology, but rather on the pedagogical challenge of conveying the results of life cycle assessment to a non-expert audience.

Abstract

Life cycle assessment is a scientific measurement method initially designed to evaluate the environmental impacts of a product or service on a given functional unit. It can be used, for instance, as a reference to communicate on the environmental performance of products, or to help in the decision-making process during a product design phase. The ISO 14072 standard explains how to carry out a life cycle assessment for an entire organization.

The transmission of results is a crucial step in a life cycle assessment mission as it partly determines the value that the customer will give to the results presented to him and, in fact, will encourage him to follow up on the study or not. This paper assesses the different ways in which the results of a life cycle assessment can be presented and makes recommendations to make it easier for the customer to understand and re-use them for company strategy. The paper also entailed the writing of a teaching aid explaining the environmental impacts used in the Environmental Footprint 3.0 method (recommended by the European Commission) in a simple and illustrated manner.



Répartition des indicateurs environnementaux de l'EF3.0 selon 2 critères © Josselin Le Goff, 2022.

Vincent PERIER

Élève ingénieur concours commun
Master of Science Management of Technology, Université nationale de Singapour

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Roland Berger

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Alexis DEVEZA, Manager

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Nicolas KANDEL, responsable de module, CMI Stratégies

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Enjeux et évolution de l'immobilier dédié à la logistique urbaine

Mots-clés : logistique urbaine, immobilier, durabilité, modèle d'évolution de marché, analyse concurrentielle et stratégique

Contexte

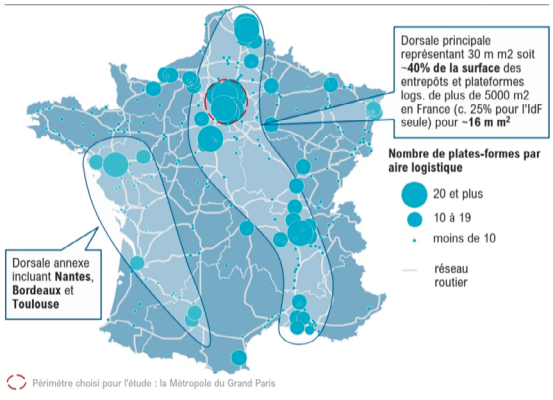
Au cours de mon projet de fin d'études, réalisé au sein du cabinet de conseil en stratégie Roland Berger, j'ai eu l'occasion de travailler à la réalisation d'une « vendor dur diligence » pour un acteur de l'immobilier logistique parisien. J'ai été amené à découvrir et modéliser le marché au sein duquel évolue cet acteur. Cette analyse a servi de base à une étude, qui va plus loin et la complète afin d'étudier les dynamiques du marché et les réponses de ses principaux acteurs.

Missions et objectifs

L'objectif de cette étude est d'étudier deux des enjeux majeurs auxquels font face les acteurs du marché de l'immobilier dédié à la logistique urbaine, puis d'explorer et analyser les premières solutions que ces derniers proposent afin de s'adapter à ces enjeux grandissants. Pour les nommer, cette étude se penche sur la modélisation de l'évolution du déséquilibre entre offre et demande sur ce marché, puis s'intéresse à l'injonction que subit ce métier à tendre vers une activité plus durable.

Résumé

Les experts et principaux acteurs du secteur de l'immobilier dédié à la logistique urbaine de la Métropole du Grand Paris s'accordent à constater un déséquilibre entre offre et demande de l'ordre de 5 % à 10 % en 2021. Ce ratio s'apprête à doubler d'ici à 2030. L'augmentation des flux de marchandises traités par la logistique urbaine de la MGP et de leur complexité, la raréfaction du foncier vont tendre à augmenter la pression concurrentielle sur le marché, obligeant les acteurs à proposer de nouvelles solutions immobilières, mieux intégrées dans leur environnement urbain. Aussi, l'évolution règlementaire encourage les acteurs à s'engager dans des projets et des opérations plus durables.



Cartographie des entrepôts et plateformes logistiques de plus de 5 000 m² (France, 2015) © Vincent Perier, 2022.

Challenges and evolution of real estate for urban logistics

Keywords: urban logistics, real estate, sustainability, market forecasting model, competitor and strategical market analysis

Context

During my final year project, carried out at the strategy consulting firm Roland Berger, I had the opportunity to work on a vendor due diligence for a player in the Parisian logistics real estate market. During this mission, I had the chance to discover and model the market in which this actor evolves. My analysis was used as a basis for this study, which goes further and completes it to assess the dynamics of the market and the responses of its main actors.

Missions and goals

The objective of this study is to analyze two of the major challenges facing players in the urban logistics real estate market and then to explore and analyze the first solutions that these players are proposing to adapt to these growing challenges. The study looks at the evolution of the imbalance between supply and demand in this market, and then looks at the injunction that this profession is facing to move towards a more sustainable activity.

Abstract

Experts and key players in the "Métropole du Grand Paris" urban logistics real estate sector agree that the year 2021 witnessed an imbalance of 5% to 10% between supply and demand. This is set to double by 2030. The increase in the flow of goods handled by urban logistics in the MGP, the complexity of this flow, and the scarcity of land will tend to increase competitive pressure on the market, forcing players to propose new real estate solutions, better integrated into the urban environment. Also, regulatory changes are encouraging players to engage in more sustainable projects and operations.

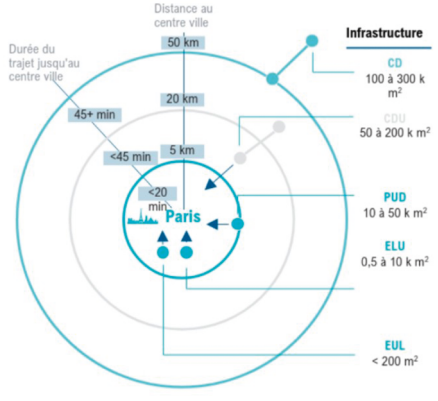


Schéma des différents types d'infrastructure de la logistique urbaine © Vincent Perier, 2022.

Éléments de bibliographie

HEITZ, Adeline, 2018. *La Métropole Logistique : Structure métropolitaine et enjeux d'aménagement. La dualisation des espaces logistiques métropolitains*. Thèse de doctorat : Aménagement de l'espace, Urbanisme. Champs-sur-Marne : université Paris-Est, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.

Candice PICHON

Élève ingénieure concours commun
Double diplôme HEC

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Nova Consulting

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Sophie LAOUSSE, chef de projet

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Henri PHILIPPE, enseignant, Accuracy

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 2 ans - Confidential

Google Trends comme outil de prédiction de fréquentation dans les sites culturels

Mots-clés : Google Trends, prédiction, fréquentation, secteurs culturels

Contexte

Ce projet de fin d'études (PFE) a été réalisé au sein du cabinet de conseil Nova Consulting, spécialisé dans la culture, le sport et le tourisme. Le contexte particulier de la crise sanitaire liée à la pandémie de Covid-19 a accéléré la nécessité pour Nova Consulting de repenser son processus d'évaluation des chiffres d'affaires des différents secteurs culturels en France.

Missions et objectifs

L'objectif de ce PFE a été de construire un outil capable de déterminer la fréquentation des sites culturels en France, en temps réel, dans le but de réaliser des prédictions de chiffres d'affaires pour différents secteurs culturels. Cet outil a ensuite été utilisé par Nova Consulting pour des missions clients et ses publications de fin d'année.

Résumé

Dans la plupart des secteurs culturels, les données officielles de fréquentation des sites ne sont pas publiées ou le sont avec plusieurs mois, voire des années de retard, alors même que leur connaissance constitue un enjeu clé pour les prises de décisions stratégiques des acteurs du monde de la culture. La construction d'un outil capable de déterminer la fréquentation des sites culturels en temps réel semble une réponse appropriée.

De nombreuses études ont déjà démontré la pertinence de l'utilisation de données Google Trends pour réaliser des prédictions de vente dans d'autres secteurs industriels ou pour la prédiction d'indicateurs économiques. Il est donc légitime de penser que les données Google Trends puissent également se révéler utiles dans le cas de la réalisation de prédictions de fréquentation de sites culturels. Le travail réalisé a démontré la véracité de cette intuition pour trois catégories d'institutions : les musées, cinémas et opéras. Il a également mis en évidence la possibilité de calculer le chiffre d'affaires des secteurs culturels associés, grâce aux prédictions de fréquentation réalisées.

Évolution des données Google Trends entre 2014 et aujourd'hui pour le mot-clé « cinéma » © Candice Pichon, 2021.

Google Trends as a traffic prediction tool for cultural sites

Keywords: Google Trends, prediction, attendance, cultural sectors

Context

This PFE took place at the consulting firm Nova Consulting, specialized in culture, sport, and tourism. My project was carried out in the context of the Covid-19 health crisis, which accelerated the need for Nova Consulting to rethink its process of evaluating the turnover of the different cultural sectors in France.

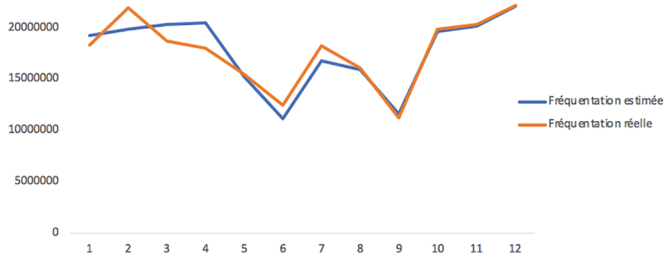
Missions and goals

The objective of this PFE was to build a tool capable of determining the frequentation of cultural sites in France in real time, with the aim of making predictions of turnover for different cultural sectors. This tool was then used by Nova Consulting for client missions and its end-of-year publications.

Abstract

In most cultural sectors, official data on site attendance is not published or is published several months or even years late, even though knowledge of this data is a key factor in strategic decision-making by cultural players. A solution would be the construction of a tool capable of determining the attendance of cultural sites in real time.

Numerous studies have already demonstrated the usefulness of Google Trends data for sales predictions in other industrial sectors or for predicting economic indicators. It is therefore likely that Google Trends data can also be used to predict the number of visitors to cultural sites. This study demonstrates the truth of this assumption for three categories of cultural sites: museums, cinemas, and operas. It also highlights the possibility of calculating the turnover of the associated cultural sectors based on attendance predictions.



Comparaison de la fréquentation estimée et de la fréquentation réelle des cinémas en France pour l'année 2019
© Candice Pichon, 2021.

Éléments de bibliographie

CHOI, Hyunyoung et VARIAN, Hal R., 2012. Predicting the present with Google Trends. *Economic record*, juin 2012, vol. 88, Issue s1, pp. 2-9.

JUDGE, Guy et HAND, Chris, 2010. Searching for the picture: forecasting UK cinema admissions making use of Google Trends data. *Department of Economics Discussion Paper*, mai 2010, n° 162, 20 p.

LHERMITTE, Marc et ALVAREZ, Hugo, 2021. Rebuilding Europe : 2e Panorama européen des industries culturelles et créatives. *EY* [en ligne], 25 janvier 2021. Disponible sur : https://www.ey.com/fr_fr/government-public-sector/panorama-europeen-des-industries-culturelles-et-creatives-editio (consulté le 03.05.2022).

Quentin CHATELAN

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Louis Vuitton

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Virginie LEGRAND, Manager supply chain accessoires

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Philippe WIESER, enseignant, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

La gestion des nouveaux produits dans le luxe : un enjeu économique et environnemental

Mots-clés : luxe, nouveaux produits, lancements, distribution, fin de vie

Contexte

En moyenne, le nombre de nouvelles collections annuelles est de quatre à six pour les grandes firmes de l'industrie de la mode et une à deux pour les grandes firmes du luxe (Sen, 2008). Ces nouvelles collections sont réparties sur plusieurs dates de lancement, de telle sorte que chaque semaine, les grands acteurs du luxe ou de la mode lancent de nombreuses nouvelles références.

Missions et objectifs

Le pilotage des nouveaux produits chez Louis Vuitton est une tâche complexe à exécuter, car il y a en moyenne cinq nouveaux SKUs lancés à la journée avec des scénarii de lancement différents d'une référence à l'autre. La complexité vient de différents paramètres comme les dates de lancement qui peuvent varier pour un même produit en fonction de la zone géographique, la quantité de magasins dans le réseau et un risque de dépréciation si nous ratons les ventes ou si nous fabriquons trop de produits (pas de soldes chez Louis Vuitton).

L'objectif est ainsi d'arriver à 100 % de produits saisonniers vendus sur leur durée de vie (souvent six mois en magasin).

Résumé

Une loi du 1er janvier 2022 interdit aux entreprises de mode de détruire leurs produits invendus. La date à laquelle les acteurs ayant recours à la destruction d'invendus devront trouver des moyens alternatifs (soldes, recyclage, surcyclage ou moins de production) est donc imminente.

La dépréciation, la casse de matières premières ou de produits finis invendus, la baisse de désirabilité, ou bien les retards de livraison aux clients font partie des risques majeurs liés aux nouveaux produits. Il convient donc d'identifier et d'analyser les paramètres impactant les nouveaux produits, de leur développement à leur fin de vie, afin de les optimiser. Le développement, le lancement ou la fin de vie sont des éléments très importants de la durée de vie des produits du luxe et ce rapport permet de cerner plus en détail les problématiques de chacune de ces étapes.

Au travers d'une étude comparative entre deux collections de produits sorties en 2020 et 2021 chez Louis Vuitton, ce mémoire présente différents leviers (de la distribution pour le lancement aux stratégies de fin de vie) permettant d'influencer la gestion des nouveaux produits.

The management of new products in the luxury industry: an economic and environmental issue

Keywords: luxury, new products, launches, distribution, end-of-life

Context

On average, the number of new collections per year is four to six for major fashion firms and one to two for major luxury firms (Sen, 2008). These new collections are distributed across several launch dates so that each week, the major players in the luxury or fashion industry launch numerous new references.

Missions and goals

Managing new products at Louis Vuitton is a difficult task because there are, on average, five new SKUs launched per day with different launch scenarios from one reference to another. The complexity stems from different parameters, such as launch dates, that can vary for the same product depending on the geographic zone, the number of stores in the network, and the risk of depreciation sales are missed or too many products are made (there are no sales at Louis Vuitton).

The objective is to achieve 100% of seasonal products sold over their lifetime (often six months in stores).

Abstract

This report focuses on new products in the luxury sector. Major luxury players launch on average more than one new product per day, making new products, especially at launch, a major strategic element. A law in effect from January 1, 2022 prohibits fashion companies from destroying their unsold products, thus setting a very close deadline by which players who do destroy unsold products will have to find alternative solutions (sales, recycling, upcycling).

Depreciation, breakage of unsold raw materials or finished products, loss of desirability, or late delivery to customers are among the major risks surrounding new products. It is therefore necessary to identify and analyze the parameters impacting new products, from development to end of life, with the aim of optimizing them. The key elements in the life cycle of luxury products are development, launch, and end of life, and this report allows us to identify in more detail the problems of each.

Through a comparative study between two product collections released in 2020 and 2021 at Louis Vuitton, this report presents different levers (from distribution to launch to end-of-life strategies) influencing new product management.

Although it concerns new products in luxury (often distributed by air freight and using rare raw materials), this topic has an environmental significance as the objective is to limit material breakage, the destruction of unsold products, the quantity of products manufactured (by manufacturing only the right quantities), and the transport ofr products (when they have been sent to the wrong place or have to be moved several times to find a customer).

Éléments de bibliographie

COMBLEZ, Coralie, 2020. *L'évolution de la considération du luxe à l'épreuve de la digitalisation de la consommation*. Thèse de doctorat : Sociologie. Perpignan : université de Perpignan.

VEG-SALA, Nathalie, 2019. *La gestion des marques de luxe face aux paradoxes de leur développement*. Mémoire de HDR : Sciences de l'Homme et Société. Nanterre : université Paris Nanterre.

Laure DARMENDRAIL

Élève ingénieure concours commun

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Danone EDP France

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Clémence RENAUD, Demand Planner

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Philippe WIESER, enseignant, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

L'intérêt des petits projets et comment les mener pour les transformations de Danone

Mots-clés : gestion de projet, petit projet, prévisions des ventes, management du changement

Contexte

Danone EDP France s'occupe de la production et de la livraison aux enseignes de produits laitiers ou végétaux Danone. Les prévisions répondent à deux enjeux principaux : assurer la qualité du service, tout en évitant les surstocks. Le métier de prévisionniste a une part opérationnelle forte, couplée à des projets. Les équipes sont en transition de module de l'ERP SAP et le groupe se réorganise sous gouvernance géographique et non plus par activité. L'équipe est donc face à de nombreux projets qui changent sa façon de travailler.

Missions et objectifs

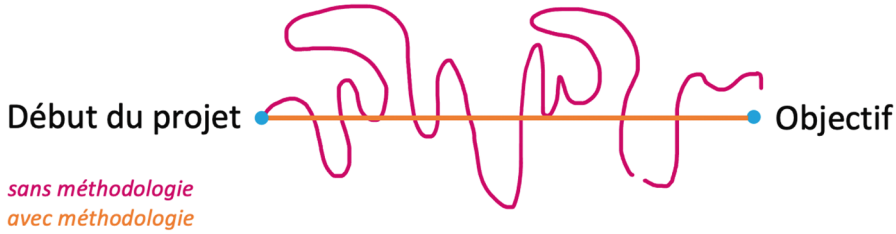
Les prévisions sont établies sur les horizons court et long termes. Elles associent actions opérationnelles et animation des équipes. Deux autres missions s'y ajoutent. La première porte sur l'évolution et l'uniformisation de l'outil Excel de pose de promotions. La seconde concerne la présence dans une instance inter-équipe journalière et la recommandation à l'équipe de son retour dans celle-ci.

Résumé

Les entreprises industrielles sont face à de nombreux enjeux, allant de la digitalisation qui transforme leurs opérations, au développement durable qui réinterroge leurs activités. Les équipes de prévisions des ventes de Danone sont face à deux projets majeurs : la réorganisation des équipes, et le changement d'ERP. De plus, leurs processus et outils nécessitent une amélioration continue.

Tous ces projets créent de petits projets, de moindre ampleur, qui concourent à assurer la compétitivité de l'entreprise, mais aussi, à former et responsabiliser les équipes. Pour ce faire, une méthodologie allégée peut être utilisée. Elle permettra de gagner en efficacité, organisation et communication.

Cette méthodologie séquence le projet en quatre étapes, chacune d'entre elles ayant un livrable associé. Ceux-ci permettent le suivi du bon déroulé du projet et la communication associée. Deux missions ont été réalisées, pour lesquelles nous proposons une adaptation de la méthodologie construite. Les organiser et les planifier permet de s'assurer de leur bon déroulé et de la pérennisation de leurs rendus.



Utiliser une méthodologie projet permet d'atteindre efficacement l'objectif du petit projet © Laure Darmendrail, 2021.

The assets of small projects and how to carry them out to support Danone's transformations

Keywords: project management, small project, demand planning, change management

Context

Danone EDP France is responsible for the production and delivery of Danone Essential Dairy and Plant based (EDP) products to retailers. Forecasts serve to ensure quality of service while avoiding overstocking. Demand planning has a strong operational component as it is coupled with particular projects. Currently, the relevant teams are in the process of transitioning the ERP's SAP module and the group is being reorganised under geographical governance rather than by activity. The demand planning team is therefore faced with numerous projects that are changing the way it works.

Missions and goals

Sales are forecasted in the short and long term. Demand planning combines operational actions and team management.

Further, two missions were led, one concerning the development and standardization of the Excel tool to forecast promotions, and the other concerning attendance of a daily inter-team meeting and the recommendation to the team of its continuation.

Abstract

Industrial companies face many challenges and opportunities: digitization is transforming operations; sustainable development is rethinking activities. Two projects in particular are impacting Danone demand planners: the company's reorganization and a change of ERP. On top of this, processes and tools demand continuous improvement.

Big projects create smaller ones, and their management is key for the company's competitivity. They also help train and empower teams. To lead them with success, a lite methodology must be used. This helps ensure efficacity, organization, and communication.

This methodology separates the project into four steps, with a deliverable for each one, helping to determine how to reach the target, and then ensuring that the project is going according to plan. They are also used to communicate. Two missions are used as examples, with the methodology adapted for each. Organizing and planning these small projects was key to ensure they were successfully led and their outcomes could be used in the long term.

Génie mécanique et matériaux

Mechanical Engineering and Materials Science

Dans le cadre de la transition énergétique et de la réindustrialisation de la France, le département GMM forme des ingénieurs de recherche ou ingénieurs-concepteurs pour le développement de nouveaux produits et matériaux. La formation apporte un socle théorique pointu et met un accent particulier sur la mise en œuvre concrète de ces outils à travers des projets de modélisation, conception et fabrication (impression 3D, prototypage rapide *etc.*).

La structure des programmes

Le département offre deux parcours :

- le parcours expert mécanique propose une approche théorique de la mécanique avec une forte composante de modélisation à **l'échelle des matériaux et des structures** ;
- le parcours expert en conception de systèmes industriels propose un spectre plus large et plus **pratique à l'échelle** des systèmes complets.

Les cours obligatoires se répartissent en trois familles :

- des cours de tronc commun (initiation au droit, à la gestion, langues, *etc.*) dont le but est de donner les bases essentielles à un ingénieur d'aujourd'hui ;
- des cours GMM qui mettent l'accent sur la modélisation et les grands domaines de la mécanique (fluides, structures et matériaux), ainsi que sur la conception de systèmes incluant la robotique ;
- des semaines thématiques faisant intervenir des experts, des professionnels et des chercheurs dans les domaines des matériaux, de la R&D et de la conception. Des visites d'entreprises sont également organisées.

Un choix de cours électifs, en GMM ou dans d'autres départements, permet de personnaliser le parcours de formation en fonction du projet professionnel de l'élève.

Les programmes

- Cycle master en 2 ans
- Formation complémentaire intégrée pour polytechniciens et normaliens civils
- Formation complémentaire intégrée des élèves du corps, adaptée pour tenir compte des obligations spécifiques du corps.

Différentes possibilités offertes en troisième année :

- Expertise en mécanique
- Durabilité des matériaux et des structures
- Approches multi-échelles des matériaux et des structures
- Science des matériaux pour la construction durable (enseigné en anglais)
- *Nuclear Energy*, spécialité démantèlement et gestion des déchets (enseigné en anglais)
- Troisième année dans une école partenaire en France ou à l'étranger.

Les points forts de la formation

- Une solide maîtrise des concepts et outils de la mécanique des milieux continus en grandes transformations
- Une approche pédagogique par projet privilégiant le travail en équipe et l'apprentissage par l'action
- Un contact étroit avec les ingénieurs dans l'industrie et avec la recherche
- L'intégration de nouveaux outils pour la conception (prototypage rapide)
- Une orientation « écoconception ».

Carrières professionnelles

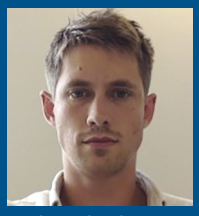
La formation prépare à des postes à haut potentiel et forte compétence scientifique et technique pour l'industrie et le secteur étatique, dans les domaines de la recherche, du développement et de la conception de nouveaux produits et matériaux :

- Ingénieur de recherche ou ingénieur concepteur
  Elle permet d'accéder à un premier poste d'ingénieur-chercheur ou d'ingénieur-concepteur en mécanique. Elle donne les bases pour une conception éco-orientée et souligne les responsabilités des ingénieurs concepteurs vis-à-vis des problématiques de développement durable.
- Cadres dirigeants.
  Elle donne la culture pour des évolutions rapides de carrière afin de devenir chef de grands projets ou responsable de programmes industriels, conduisant ensuite à des carrières d'experts internationaux ou de cadres dirigeants de ces entreprises.

Semaine conception GMM – Thèmes structures volantes, fonderie et raquettes © Étudiants GMM – École des Ponts ParisTech.

Karam Sab
Président
Department Head

Laurent Maghdissian
Responsable académique
Academic Head



Paul Rambach
Responsable académique depuis octobre 2021
Academic Head since October 2021

Sandrine Calvary
Inspectrice des études
Academic Advisor

Yushrinah Stiegelmann
Inspectrice des études depuis octobre 2021
Academic Advisor since October 2021

Josiane Niéto
Assistante polyvalente
Department Assistant

In the context of energy transition and the reindustrialization of France, the GMM department trains research engineers or design engineers for the development of new products and materials. The training provides a solid theoretical foundation and places particular emphasis on the concrete implementation of these tools through modeling, design and manufacturing projects (3D printing, rapid prototyping, etc.*).*

Programs

The department offers two tracks:

- *the mechanical expert track offers a theoretical approach to mechanics with a strong modeling component* ***at the scale of materials and structures****;*
- *the course on industrial system design offers a broader and more practical spectrum* ***on the scale of complete systems****.*

The compulsory courses are divided into three groups:

- *Core curriculum courses (e.g. introduction to law, management, languages, etc.) which aim to provide the fundamentals required for today's engineers;*
- *Department courses: The emphasis is placed on modelling and the fields of mechanical engineering (fluids, structures, materials) together with Eco-design and industrial system design and robotics in particular;*
- *Thematic weeks are organized with contributions from experts, professionals, and researchers in the fields of materials, R&D, and design. A study trip and visits to companies are also organized.*

A choice of elective courses delivered by the Mechanical Engineering and Materials Science Department and other Departments allows students to tailor their study program to career objectives.

The programs

- *Two-year Master's program,*
- *Special program for École polytechnique and École normale supérieure students,*
- *Special program for French Government Engineers, adapted to take into account their specific obligations.*

Different possibilities offered in the final year:

- *Advanced Mechanics courses,*
- *Durability of Materials and Structures for Energy,*
- *Multiscale Approaches for Materials and Structures,*
- *Materials Science for Sustainable Construction (taught through English),*
- *Nuclear Energy, specialization in decommissioning and waste management (MNE-DWM, taught through English),*
- *Final year in a partner institution in France or abroad.*

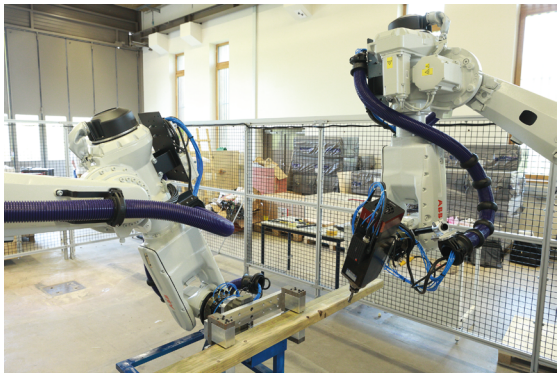
Highlights of the program

- *Solid mastery of tools and concepts in Continuum Mechanics,*
- *Project-based approach emphasizing teamwork and learning by doing,*
- *Close interaction with industry engineers and researchers,*
- *Integration of new tools for design (rapid prototyping),*
- *Eco-design orientation.*

Career opportunities

This program prepares students for high-level positions in industry and the state sector, requiring solid scientific and technical know-how in research, development, and design of new products and materials:

- *Research or design engineer*
  It allows students to access a first position as a research or design engineer in mechanical engineering. It provides the basis for eco-focused design and underlines the responsibilities of design engineers with regard to sustainable development issues.
- *Senior executives*
  This program provides a springboard for fast track promotion towards positions as head of major projects or industrial programs, leading to careers as international experts or senior executives of these companies.



Robot 6 axes © Yann Piriou/École des Ponts ParisTech.

Laboratoires et chaires
Laboratories and chairs

Laboratoires • Laboratories

CERMICS

Centre d'enseignement et de recherche en Mathématiques et calcul scientifique. Thématiques : mathématiques appliquées, calcul scientifique, modélisation, optimisation.
Research Center in Mathematics and Scientific Computing. Themes: applied mathematics, scientific computing, modeling, optimization.

IFSTTAR

Institut français des Sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.
The French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks.

Institut Jean Le Rond d'Alembert, université Pierre et Marie Curie

Mécanique, acoustique, énergétique.
Mechanics, Acoustics, Energy.

LadHyX, École polytechnique

Laboratoire d'hydrodynamique.
Hydrodynamics Laboratory.

LHSV

Laboratoire d'hydraulique Saint-Venant. Thématiques : mécanique des fluides appliquée à l'hydraulique et l'environnement (domaines fluvial, côtier et portuaire).
Saint-Venant Hydraulics Laboratory. Themes: fluid mechanics applied to hydraulics and the environment (rivers, coasts, and harbors).

LIGM

Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge. Thématiques : algorithmes et architectures pour l'analyse et la synthèse d'images, combinatoire algébrique et calcul symbolique, logiciels, réseaux et temps réel, modèles et algorithmes, signal et communication.
Gaspard Monge Computer Science Laboratory. Themes: algorithms and architectures for image analysis and synthesis, algebraic combinatorics and symbolic computation, software, networks and real time, models and algorithms, signal and communication.

LMS, École polytechnique

Laboratoire de mécanique des solides.
Solid Mechanics Laboratory.

Laboratoire Navier

Thématiques : recherches de base sur la mécanique et la physique des matériaux et des structures et leurs applications à la géotechnique, au génie civil, à la géophysique et à l'exploitation pétrolière.
Themes: basic research on the mechanics and physics of materials and structures, and their applications to geotechnics, civil engineering, geophysics, and the oil industry.

Chaires • Chairs

Chaire EDF

La chaire EDF vise à former des ingénieurs spécialistes dans le domaine stratégique nucléaire à travers les masters Durabilité des matériaux et des structures dans l'énergie et Énergie nucléaire, spécialité démantèlement et gestion des déchets.

The EDF Group Chair was created to educate engineers specialized in the strategic domain of nuclear energy through two-Master Degree Programs Durability of Materials and Structures for Energy and Nuclear Energy, specialization in decommissioning and waste management.

Les projets de fin d'études
Final year projects

Calcul de structure / éléments finis • *Finite element modelling*

VALENTIN POUSSARD | Simulation numérique de câbles composites
Numerical simulation of composite cables

Conception / prototypage • *Design / prototyping*

GRÉGOIRE VERDES | Le développement logiciel au service de la stratégie d'une équipe de course
Software development at the service of a racing team strategy

Ingénierie de projet • *Project engineering*

AMIRA BEN AHMOUDA | Le *World Class Manufacturing* appliqué à un site de production
The World Class Manufacturing applied to a production plant

Matériaux • *Materials*

NOAM DEMRI | Bio-ingénierie magnétique et microfluidique du tissu musculaire
Magnetic and microfluidics bioengineering of muscle tissue

LAURANE PREUMONT | Optimisation topologique et fabrication additive de miroirs céramiques hautes performances
Topology optimization and additive manufacturing of high-performance ceramic mirrors

Mécanique des fluides • *Fluid mechanics*

BENOÎT CUILHÉ | Cartographie en temps réel de la qualité de l'air sur la Cité Descartes
Real-time air quality mapping in Cité Descartes

FLORENTIN DANIEL | Étude du transport turbulent dans les étoiles radiatives : l'instabilité de Tayler-Spruit
A study of turbulent transport in radiative stars: the Tayler-Spruit instability

JÉRÉMY KALFOUN | Analyse de la méthode *overset* en CFD : interpolations, stabilité et conservation
Analysis of the overset method for CFD: Interpolations, stability and conservation

Valentin POUSSARD

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Projet d'ingénieur en laboratoire réalisé à :
Laboratoire MSSMat

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Damien DURVILLE, chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Romain MESNIL, chef de projet du Co Innovation Lab, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Simulation numérique de câbles composites

Mots-clés : câbles, éléments finis, simulation numérique, hyperélasticité

Contexte

La conception des câbles nécessite d'évaluer leur comportement, notamment, par la simulation numérique. Pour certaines applications, les fils peuvent être entourés d'une matrice en élastomère, ce qui ajoute des contraintes supplémentaires pour la simulation.

Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études a été réalisé avec Multifil, logiciel développé par le laboratoire MSSMat et dédié, notamment, à la simulation de câbles par éléments finis. Le travail a été centré autour de l'utilisation du logiciel et de l'amélioration du modèle utilisé pour la simulation des câbles composites entourés d'une matrice en élastomère. L'un des enjeux était de proposer une approche économe en temps de calcul par rapport aux modèles d'éléments finis tridimensionnels classiques.

Résumé

Le logiciel Multifil utilise les éléments finis pour la simulation de câbles. Pour le cas particulier des câbles composites, le modèle fait appel à des maillages incompatibles. Les fils sont modélisés par des éléments unidimensionnels de poutres à cinématique enrichie, et la matrice entourant les fils est modélisée par des éléments tridimensionnels. Un couplage est réalisé entre la matrice et les fils, qui sont également couplés entre eux. Afin de gagner en précision sur la modélisation du comportement de la matrice en élastomère, une loi de comportement hyperélastique polynomiale a été implémentée dans le code. Une attention particulière a été portée à l'intégration de la partie liée à l'incompressibilité. Le couplage entre les fils et la matrice a été amélioré, afin de s'affranchir d'instabilités observées durant les calculs. Le modèle a finalement été utilisé pour simuler des câbles composites sur des cas tests, et des comparaisons avec des résultats expérimentaux ont été réalisées afin d'évaluer la robustesse du modèle.

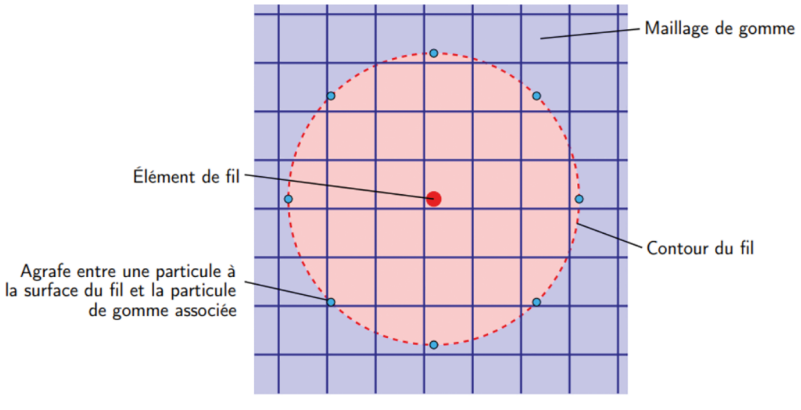


Illustration du couplage des éléments de fil avec la matrice © Valentin Poussard, 2021.

Calcul de structure / éléments finis
Finite element modelling

Conception / prototypage
Design / prototyping

Évaluation environnementale
Sustainable engineering

Ingénierie de projet
Project engineering

Interaction fluide structure
Fluid-structure interaction

Matériaux
Materials

Mécanique des fluides
Fluid mechanics

Mécatronique et robotique
Mechatronics and robotics

Modélisation
Modelling

Numerical simulation of composite cables

Keywords: cables, finite elements, numerical simulation, hyperelasticity

Context

Cable design requires the assessment of cable behaviour, which includes numerical simulation. For some applications, the wires may be surrounded by an elastomer matrix, which adds additional constraints to the simulation.

Missions and goals

This final year project was carried out with Multifil, a software developed at Laboratoire MSSMat and dedicated to the simulation of cables using finite elements. The work was focused on the use of the software and the improvement of the model for the simulation of composite cables. One of the challenges was to propose a more time-efficient approach than offered by conventional three-dimensional finite element models.

Abstract

Multifil uses finite elements for the simulation of cables. In the case of composite cables, the model uses overlapping meshes: the wires are modelled by one-dimensional kinematically-enriched beam elements, and the matrix surrounding the wires is modelled by three-dimensional elements. A coupling is made between the matrix and the wires, and the wires are also coupled with each other. In order to gain accuracy in the modelling of the behaviour of the elastomer matrix, a polynomial hyperelastic behaviour law was implemented in the code, with particular attention paid to the integration of the incompressibility part. The coupling between the wires and the matrix was improved in order to avoid instabilities occuring during calculation. Eventually, the model was used to simulate composite cables on test cases, and comparisons with experimental results were made to assess the robustness of the model.

$$W = \sum_{i,j=0}^{n} C_{ij}(\bar{I}_1 - 3)^i(\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^{m} D_k(J-1)^{2k}$$

Densité d'énergie élastique d'un matériau hyperélastique polynomial © Valentin Poussard, 2021.

Éléments de bibliographie

BONNERIC, Matthieu, AUBIN, Véronique et DURVILLE, Damien, 2019. Finite element simulation of a steel cable – rubber composite under bending loading: influence of rubber penetration on the stress distribution in wires. *International journal of solids and structures*, mars 2019, vol. 160, pp. 158-167.

DURVILLE, Damien, 2012. Contact-friction modeling within elastic beam assemblies: an application to knot tightening. *Computational mechanics*, avril 2012, vol. 49, n° 6, pp. 687-707.

STEINBRECHER, Ivo, MAYR, Matthias, GRILL, Maximilan J. *et al.*, 2020. A mortar-type finite element approach for embedding 1D beams into 3D solid volumes. *Computational mechanics*, vol. 66, n° 6, pp. 1377-1378.

Grégoire VERDES

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Saintéloc Racing

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Nicolas CHOMAT, ingénieur d'exploitation programme GT3

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Xavier CLERC, responsable de module, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Le développement logiciel au service de la stratégie d'une équipe de course

Mots-clés : développement logiciel, stratégie, analyse de données, performance, fiabilité

Contexte

Saintéloc Racing est une équipe de course évoluant dans plusieurs championnats de catégorie Grand Tourisme (GT), aux échelles française et européenne. Elle fait rouler des pilotes professionnels et amateurs, ces derniers payant pour rouler. Elle travaille sans cesse sur les réglages de la voiture et la stratégie de course, entre autres, pour proposer les meilleures prestations possibles aux clients.

Missions et objectifs

En tant qu'ingénieur *data*, la mission principale est de collecter et d'analyser les données de la voiture lors des courses ou séances d'essais pour assurer la fiabilité et contribuer à la performance du véhicule. En parallèle, il s'agit d'améliorer le logiciel de stratégie de l'équipe. L'objectif de toutes ces missions est d'aider l'équipe dans sa préparation et sa gestion des courses.

Résumé

Ce projet de fin d'études (PFE) s'est déroulé chez Saintéloc Racing, équipe de sport automobile basée à Saint-Étienne. Il s'agissait d'une mission d'ingénieur *data* pour la saison 2021, qui consistait, en particulier, à collecter et analyser des données de la voiture pour contribuer à la fiabilité et à la performance du véhicule et à participer à l'élaboration de la stratégie de course.

En guise d'aide à la stratégie, l'équipe utilise un logiciel dédié qui permet de visualiser de multiples informations pendant la course. Or, il est possible de créer des modules supplémentaires et de les intégrer au logiciel.

Ce PFE s'intéresse plus spécifiquement à la création de *plug-ins* additionnels qui permettent de visualiser de nouvelles informations et de fournir une aide à la décision.

Pour mener à bien cette mission, il faut, en premier lieu, se familiariser avec les outils nécessaires, puis sélectionner, à l'aide de la littérature, une méthode de développement adaptée. A ainsi été retenu un développement agile et itératif. Par intermittence, en raison d'un calendrier de courses assez dense, d'autres modules ont été créés. Les itérations de développement permettent, d'abord, de mettre en place le fonctionnement de base de chaque module, puis d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires. Les modules ainsi créés sont validés par des tests utilisant des *replays* de sessions et peuvent être, par la suite, utilisés lors de courses en direct.

Software development at the service of a racing team strategy

Keywords: software development, strategy, data analysis, performance, reliability

Context

Saintéloc Racing is a racing team which competes in several championships in the Grand Tourisme (GT) category, at French and European levels. Its drivers are both professional and amateur, the latter paying to drive. The team work endlessly on the car setup and the race strategy, among other things, to deliver the best experiences possible to its customers.

Missions and goals

As data engineers, our main mission is to collect and analyze data from the car during race meetings or test sessions so as to ensure reliability and to help improve performance. At the same time, we are in charge of improving the team's strategy software. The goal of all these missions is to help the team in the preparation and management of races.

Abstract

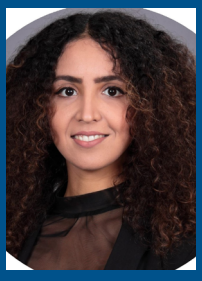
For the final project of our studies, we spent several months at Saintéloc Racing, a racing team located in Saint-étienne. Within the team, we had the role of data engineers for the 2021 season. We had multiple and various missions, the main one being the collection and analysis of data from the car to ensure reliability and performance. The data engineer also helps in the preparation of the race strategy.

To help with the strategy, the team uses some software that allows the display of a lot of information during a race. It is also possible to create and implement additional modules in the software. This is the topic of our end-of-studies project at Saintéloc Racing. The goal is to create additional plug-ins that allow the visualization of new information and provide the team with help in the decision-making processes. Hence the title of this dissertation: software development at the service of a racing team strategy.

In order to fulfil this mission, the first step is to get used to the tools we will need over the season. Then we choose a suitable method of development using our bibliography research. We go on with an agile development based on iterations. The creation of modules that follows cannot be continuous due to the recurring races in the calendar. The different iterations of this software development allow for each module to implement the basic functioning first and afterwards add secondary functionalities. We finally obtain plug-ins that can be tested using session replays. Once approved, they can be used for real races.

Éléments de bibliographie

LONCHAMP, Jacques, 2015. *Analyse des besoins pour le développement logiciel : recueil et spécification, démarches itératives et agiles*. Paris : Dunod, 315 p.



Amira BEN AHMOUDA

Élève ingénieure double diplôme
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), Tunisie

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Saint-Gobain Glass

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Guilain DE PLINVAL, ingénieur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Laurent MAGHDISSIAN, responsable académique, École des Ponts ParisTech

Confidentiel - Confidential - 5 ans

Le *World Class Manufacturing* appliqué à un site de production

Mots-clés : WCM, Q&MP, découpe, Major Kaizen, industrie 4.0

Contexte

Le *World Class Manufacturing* est une méthodologie puissante qui permet aux personnels de changer d'état d'esprit et de contribuer à la valeur ajoutée de l'entreprise, à maintenir la durabilité de l'entreprise, ainsi qu'à créer un avantage concurrentiel. Aujourd'hui, dans un monde de plus en plus complexe, dynamique et compétitif où les entreprises luttent pour maintenir leur avantage concurrentiel, le WCM est plus important que jamais.

À cet égard, de nombreuses entreprises manufacturières ont pris conscience de l'importance d'améliorer la productivité de leurs lignes de production en déployant l'amélioration continue à travers la méthode WCM.

Missions et objectifs

Dans ce contexte, nous cherchons à comprendre comment les industries manufacturières peuvent tirer parti de ce concept pour améliorer leur productivité à travers l'exemple du groupe Saint-Gobain Glass, et également admettre comment ce moteur clé de l'amélioration continue fonctionne réellement afin d'améliorer l'efficacité, les performances et assurer le zéro défaut. Enfin, nous allons découvrir ce qu'il faut pour mener une transformation digitale efficiente sur les bases de cette méthodologie et construire un environnement où l'industrie 4.0 et le WCM peuvent coexister.

Résumé

Pendant ma mission au sein de l'usine Chantereine en tant qu'ingénieure en production, impliquée dans les aspects du fonctionnement d'une usine multinationale, j'ai eu l'opportunité de travailler sur une vaste palette de sujets : de WCM (*World Class Manufacturing*), la conduite du changement et la transformation digitale et le concept d'industrie 4.0.

Cela m'a permis de me questionner sur la compréhension de la méthodologie du WCM, la façon dont elle est déployée sur un site industriel et de la valeur qu'elle peut apporter à son environnement.

Je me suis aussi intéressée aux relations qui peuvent exister entre le WCM et l'évolution digitale de l'industrie d'aujourd'hui et comment elles peuvent coexister dans un milieu aussi dynamique et évolutif tel que les usines de Saint-Gobain Glass.

Ce rapport est axé sur la compréhension exhaustive du WCM Saint-Gobain et rapproche la théorie à l'application en s'appuyant sur l'illustration des différentes phases d'une route du WCM de réduction des pertes. On s'intéresse également à la relation qui existe entre le WCM en tant que paradigme méthodologique et l'industrie 4.0 en tant que concept technique et les différentes facettes qui peuvent lier ces deux modèles. Plusieurs problématiques techniques sont mises en évidence dans le but d'illustrer au mieux les aspects évoqués dans le rapport.

The World Class Manufacturing applied to a production plant

Keywords: WCM, Q&MP, cut-off line, Major Kaizen, industry 4.0

Context

This report focuses on a comprehensive understanding of WCM at Saint-Gobain Glass and brings theory to application by illustrating a WCM route through a loss reduction project. It is thus interesting to invoke the relationship between WCM as a methodological paradigm and Industry 4.0 as a technical concept and explore the different bonds that can link these two models. Several technical issues are be highlighted in order to illustrate the aspects mentioned above in the best way possible.

Missions and goals

Waste reduction of the cut-off line yield:

- *Control the parameters of the cut-off table in order to improve the performane of the line.*
- *Conduct 5S projects.*
- *Conduct an in-depth analysis with the "5 whys" or "Makigami" method to detect root causes.*
- *Standarize the process and maintain financial gains.*

Abstract

During the mission I conducted at the Chantereine factory as a production engineer involved in the various aspects of a multinational factory, I had the opportunity to work on a wide range of subjects, from WCM (World Class Manufacturing) to change management and the industry 4.0 concept. This allowed me develop my understanding of the WCM methodology, the way it is deployed on an industrial site, and the value it can bring to its surrounding environment. Regarding the possible relationship between WCM and the digital evolution of the industry today, I had the opportunity to observe how it unfolded in an evolving environment such as the Saint-Gobain Glass factory.

This report focuses on a comprehensive understanding of WCM at Saint-Gobain Glass and brings theory to application by illustrating a WCM route through a loss reduction project. It is thus interesting to invoke the relationship that exists between WCM as a methodological paradigm and Industry 4.0 as a technical concept and explore the different bonds that can link these two models. Several technical issues are highlighted in order to illustrate the aspects mentioned above in the best way possible.

Éléments de bibliographie

BRITTON, Graeme, 1989. *Japanese techniques applied in the USA: Japanese manufacturing techniques by RJ Schonberger*. S. L. : Macmillan, 260 p.

GAUME, Olivier, 2004. *Découpe du verre plat* [en ligne]. S. L. : Technique de l'ingénieur, BM 7 428. DOI: 10.51257/a-v1-bm7428.

Noam DEMRI

Élève ingénieur concours commun
Master BioMedical Engineering, École supérieure de physique et de chimie industrielles, Paris

Promotion 2020

Début de doctorat réalisé à :
Institut Curie

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Claire WILHELM, directrice de recherche

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Brigitte VINCON-LEITE, chercheuse, LEESU, École des Ponts ParisTech

Bio-ingénierie magnétique et microfluidique du tissu musculaire

Mots-clés : bio-ingénierie, magnétisme, microfluidique, muscle

Contexte

La bio-ingénierie est confrontée au défi que pose la biogenèse d'organes *in vitro*, c'est-à-dire la possibilité de produire, en laboratoire, des constructions biologiques capables de répliquer le fonctionnement d'organes ou de tissus biologiques dans le corps vivant. Ce défi, encore hors de portée aujourd'hui, ouvrirait de nouvelles possibilités pour la médecine régénérative et toutes sortes d'expérimentations médicales.

Missions et objectifs

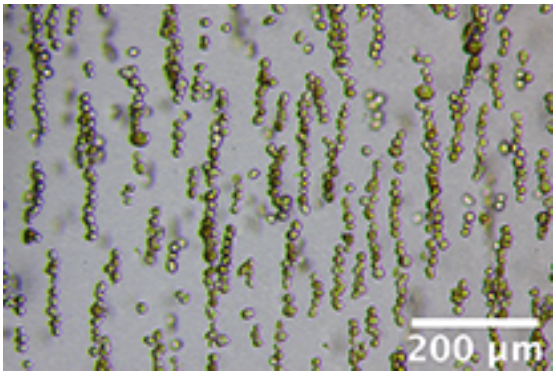
L'objectif de cette étude est de développer une nouvelle méthodologie de recherche dans le domaine de la bio-ingénierie 3D combinant bio-ingénierie magnétique et microfluidique, afin de reproduire *in vitro* du tissu musculaire squelettique.

Résumé

Ce projet de fin d'études (PFE) développe une nouvelle approche d'ingénierie tissulaire musculaire. Des cellules précurseurs musculaires C2C12 sont incubées avec des nanoparticules superparamagnétiques, qu'elles internalisent. Ce procédé les rend superparamagnétiques elles-mêmes. Leurs mouvements, ainsi que leur organisation, peuvent donc être contrôlés par des aimants.

Une première approche consiste à aligner les cellules dans un gel de collagène. Après avoir ensemencé les cellules dans du collagène liquide, elles sont placées dans un champ magnétique statique élevé avec un gradient proche de zéro. Cela permet aux cellules de s'aligner et de former des chaînes le long des lignes de champ magnétique. Au fur et à mesure qu'elles s'alignent, le collagène polymérise, bloquant ainsi les cellules dans une structure anisotrope de chaînes parallèles. En 24 heures seulement, les cellules forment un réseau de structures semblables à des fibres. En les laissant en milieu de différenciation, il est possible de les voir mûrir, fusionner et se différencier en fibres musculaires.

Les cellules magnétiques peuvent aussi être utilisées dans le cadre d'une méthode de bio-impression magnétique. Des procédés de micro-fabrication permettent de réaliser des motifs magnétisables en nickel de toute forme (étoile, croix, goutte, *etc.*) au micromètre près. Une fois ces motifs placés sur un aimant, il suffit de laisser des cellules magnétiques sur ces motifs pendant quelques heures pour qu'elles s'y agrègent et forment un tissu cohésif de la forme du motif.



Alignement de cellules musculaires magnétiques dans du collagène
© Noam Demri, 2021.

Magnetic and microfluidics bioengineering of muscle tissue

Keywords: bioengineering, magnetism, microfluidics, muscle

Context

A key challenge of bio-engineering is in vitro organ biogenesis, which consists of reproducing in a laboratory biological constructs of living cells behaving like actual tissues of the human body. This challenge, still out of reach, would open new possibilities for regenerative medicine as well as for all sorts of medical trials.

Missions and goals

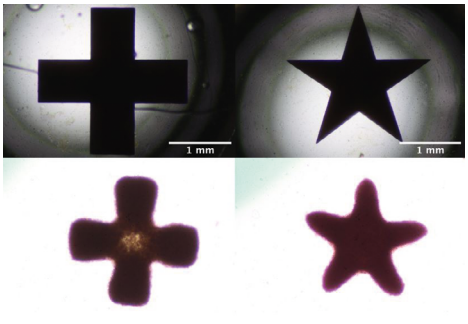
My goal is to develop a novel research methodology of 3D tissue bio-engineering, combining magnetic tissue engineering and microfluidics specifically applied to engineering in vitro skeletal muscle tissue.

Abstract

During my PFE, I developed a new approach to muscle tissue engineering. I incubate C2C12 muscle precursor cells with superparamagnetic nanoparticles, which they internalize. This makes the cells superparamagnetic. Their movement, as well as their organization, can therefore be controlled with magnets.

A first approach consists of aligning the cells in a collagen gel. After seeding the cells in liquid collagen, we place them in a high static magnetic field with a gradient close to zero. This allows the cells to align and form chains along the magnetic field lines. As the cells align, the collagen polymerizes, which traps the cells into an anisotropic structure of parallel chains. After just one day, we observe that the cells form a network of fiber-like structures. By leaving the cells in differentiation medium, we can see them mature, fuse, and differentiate into muscle fibers.

Another use for magnetic cells that I have investigated is a magnetic bio-printing method. Using microfabrication processes, it is possible to produce magnetic patterns made out of nickel, of any given shape (star, cross, drop, etc.), with micrometric details. Once these patterns are placed on a magnet, it suffices to leave the magnetic cells on these patterns for a few hours so that they aggregate on the patterns and form a cohesive tissue in the shape of the pattern.



Tissus de cellules magnétiques (en bas) créés à partir de motifs magnétiques (en haut) © Noam Demri, 2022.

Éléments de bibliographie

DU, Vicard, LUCIANI, Nathalie, RICHARD, Sophie *et al.*, 2017. A 3D magnetic tissue stretcher for remote mechanical control of embryonic stem cell differentiation. *Nature Communications*, septembre 2017, vol. 8, n° 1, pp. 1-12.

LAM, Mai T., HUANG, Yen-Chih, BIRLA, Ravi K. *et al.*, 2009. Microfeature guided skeletal muscle tissue engineering for highly organized 3-dimensional free-standing constructs. *Biomaterials*, vol. 30, n° 6, pp. 1150-1155.

NEAL, Devin, SAKAR, Mahmut Selman, ONG, Lee-Ling S. *et al.*, 2014. Formation of elongated fascicle-inspired 3d tissues consisting of high-density, aligned cells using sacrificial outer molding. *Lab on a Chip*, vol. 14, n° 11, pp. 1907-1916.

Laurane PREUMONT

Élève ingénieure concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Safran REOSC

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Jacques RODOLFO, directeur R&T

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Bruno SOULIER, enseignant, ENS Paris-Saclay

Confidentiel - Confidential - 5 ans

Optimisation topologique et fabrication additive de miroirs céramiques hautes performances

Mots-clés : miroirs hautes performances, fabrication additive, optimisation topologique, méthode des plans d'expérience, carbure de silicium

Contexte

Les surfaces optiques hautes performances sont obtenues par polissage fin de substrats de matière première, idéalement dotée d'une faible distorsion thermique pour une forte raideur spécifique. Par sa maîtrise des techniques de polissage les plus avancées, l'entreprise REOSC se positionne en fleuron de l'industrie française.

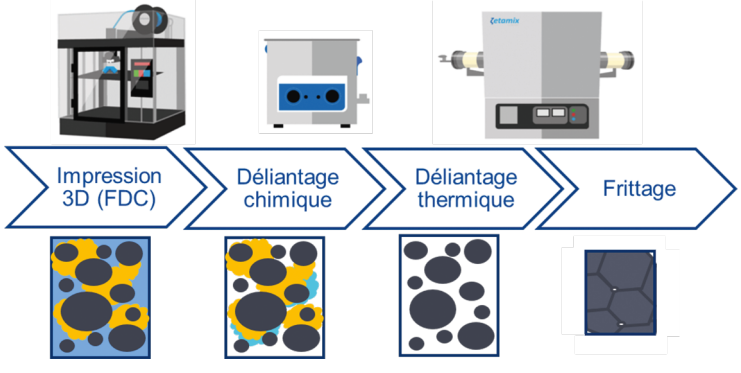
Missions et objectifs

Fidèle à son héritage de pionnier, l'entreprise développe un nouveau procédé de fabrication en amont du polissage des substrats de céramique technique : la fabrication additive de céramique SiC pour les applications optiques. La performance mécanique d'un miroir est, entre autres, dictée par ses défauts de rugosité et de forme, ainsi que par sa déformation mécanique en service.

Résumé

Dans une première partie, les résultats expérimentaux d'un plan d'expérience sont analysés pour conclure sur la combinaison de paramètres d'impression la plus favorable pour les surfaces à polir. Une étude bibliographique permet d'établir un modèle physique de l'extrusion de céramique qui éclaire les résultats du plan d'expérience construit sur un modèle linéaire avec interactions.

Dans une deuxième partie, une étude de cas permet d'explorer le potentiel de l'optimisation topologique pour la conception mécanique de miroirs hautes performances. Différents algorithmes sont étudiés, permettant de converger vers une stratégie de conception performante au regard des techniques de conception actuelles. Bien que l'optimisation topologique permette de réaliser le potentiel de la fabrication additive, procédé pour lequel le coût de la complexité structurelle est minimisé, des résultats sont également proposés pour une application immédiate dans le système de production actuel.



Procédé FDC © Laurane Preumont, 2021.

Topology optimization and additive manufacturing of high-performance ceramic mirrors

Keywords: high-performance mirrors, additive manufacturing, topology optimization, design of experiments, silicon carbide

Context

High-performance mirrors are manufactured by polishing raw material substrates that show low thermal distortion and high specific stiffness. REOSC is building on its heritage of state-of-the-art polishing activities by developing a new manufacturing technology for engineering ceramic substrates, namely the additive manufacturing of ceramics for optical applications.

Missions and goals

Mechanical performance is assessed by a mirror's surface quality, meaning roughness and deformity, as well as the mirror's deflection under serviceability loading. Mechanical design can be improved by topology optimization algorithms, enabling both lighter and stiffer structures. This structural complexity can then be manufactured through trail-blazing additive manufacturing technology for optical systems.

Abstract

First, experimental results from a past design of experiment are analyzed to determine the most favorable combination of printing parameters for the surfaces to be polished. A bibliographical study allows to establish a physical model of ceramic extrusion which sheds light on the results of the experimental design built on a linear model with interactions.

Second, a case study is conducted to explore the potential of topological optimization for the mechanical design of high-performance mirrors. Different algorithms are studied, leading to an efficient design strategy compared to current design techniques. Although topological optimization can fulfil the potential of additive manufacturing, a process for which the cost of structural complexity is minimized, results are also provided for immediate application in the current production system.

Différentes topologies en 3D © Grégoire Allaire et François Jouve, 2009, CC-BY-NC-ND (source : *Design et formes optimales (II)*, Disponible sur : http://images.math.cnrs.fr/Design-et-formes-optimales-II.html?lang=fr).

Éléments de bibliographie

ALLAIRE, Grégoire et SCHOENAUER, Marc, 2007. *Conception optimale de structures*. Berlin : Springer, 292 p.

BELLINI, Anna, 2002. *Fused deposition of ceramics: a comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design*. Philadelphie : Drexel University, 594 p.

GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin, CANO, Santiago, SCHUSCHNIGG, Stephan *et al.*, 2018. Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. *Materials*, vol. 11, n° 5, pp. 840-876.

Benoît CUILHÉ

Élève ingénieur concours commun
Master Mécanique des fluides : fondements et applications, Sorbonne Université

Promotion 2020

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Centre d'enseignement et de recherche en Environnement atmosphérique (CEREA)

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Yelva ROUSTAN, chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Martin FERRAND, ingénieur-chercheur, EDF R&D, CEREA

École des Ponts ParisTech

Cartographie en temps réel de la qualité de l'air sur la Cité Descartes

Mots-clés : écoulements atmosphériques, mécanique des fluides numériques (MFN), analyse dimensionnelle, qualité de l'air, instabilités de Von Kármán

Contexte

Le Centre d'enseignement et de recherche en Environnement atmosphérique (CEREA, laboratoire commun EDF R&D - ENPC) développe une cartographie de la qualité de l'air en temps réel sur le campus de la Cité Descartes. Les études sont réalisées sur un sous-ensemble représentatif des conditions météorologiques, en termes de direction et de force du vent et de stabilité atmosphérique, constituant une base de champ de vent.

Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études (PFE) vise à fournir les éléments de modélisation théorique afin de construire une base optimale selon deux aspects :

- en réduisant au minimum la taille de la base pour des questions de stockage de données ;
- en construisant une base qui permette de bien modéliser la dispersion de polluants, calculées en temps réel sur champ figé.

Résumé

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été réalisée, notamment, sur une des difficultés majeures de la simulation numérique de ces écoulements atmosphériques, à savoir, la prise en compte des variations de densité. La modélisation la plus courante est l'approximation de Boussinesq que nous avons re-dérivée complètement, suite aux travaux de Spiegel et Veronis. Cette approximation permet de considérer que la densité ne dépend que de l'altitude, sauf dans le terme de flottabilité où elle varie linéairement avec la température potentielle.

Nous montrons que si les équations sont correctement mises à l'échelle d'une vitesse donnée, il est possible de résoudre une fois les quantités redimensionnées et d'obtenir les quantités instantanées pour toute autre vitesse d'entrée en utilisant une simple règle à calcul. Cette méthode fonctionne dans un cadre précis (approximations physiques) établi de manière rigoureuse. La méthodologie a ensuite été validée numériquement par des calculs CFD avec le logiciel code_saturne, et ce, pour différents niveaux de stabilité atmosphérique, élargissant ainsi les travaux de Vendel menés seulement sur une atmosphère neutre.

Cependant, la présence d'instationnarités basse-fréquence, de type Von Kármán, dans le sillage des bâtiments peut conduire à un non-respect de la condition de similitude de Strouhal. Cela a pour conséquence de ne pas modéliser la dispersion qui s'effectue dans ce type de sillage. Nous avons développé un modèle simple basé sur l'autocorrélation temporelle, validé sur le cas académique d'écoulement autour d'un cylindre.

Domaine retenu pour le projet AirDescartes © Benoît Cuilhé, 2021. Données : ODbl, carte : Contributeurs d'OpenStreetMap, 2021, CC-BY-SA (source : OpenStreetMap).

Real-time air quality mapping in Cité Descartes

Keywords: atmospheric flows, numerical fluid mechanics (NFM), dimensional analysis, air quality, Von Kármán instabilities

Context

The Centre d'enseignement et de recherche en Environnement atmosphérique (CEREA, EDF R&D - ENPC joint laboratory) is developing a real-time air quality mapping project on the Cité Descartes campus. The studies are carried out on a representative subset of meteorological conditions, namely wind direction, wind strength, and atmospheric stability, constituting a wind fields database.

Missions and goals

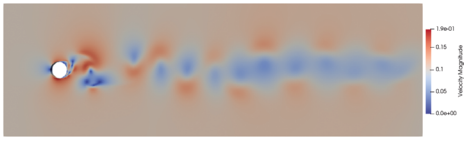
The aim of this PFE is to provide the theoretical modelling elements to build an optimal base in two ways: firstly by minimising the size of the database for data storage purposes, and secondly by constructing a database that allows the dispersion of pollutants, calculated in real time on a frozen field, to be modelled.

Abstract

Firstly, a bibliographical study was carried out, notably on one of the major difficulties of the numerical simulation of these atmospheric flows, which is to take into account density variations. The most common model is the Boussinesq approximation, which we completely redesigned following the work of Spiegel and Veronis. This approximation allows to consider that density depends only on altitude, except in terms of buoyancy, where it varies linearly with the potential temperature.

We show that if the equations are correctly scaled to a given velocity, it is possible to solve them once the quantities have been rescaled and obtain instantaneous quantities for any other input velocity using a simple slide rule. This method works within a precise framework (physical approximations) established in a rigorous manner. The methodology is then validated numerically by CFD calculations with the code_saturne software for different levels of atmospheric stability, thus extending Vendel's work carried out only in a neutral atmosphere.

However, in the set of similarity conditions, there is, notably, a Strouhal similarity, and the presence of low-frequency instationnarities of the Von Kármán type in the wake of the buildings can lead to a non-respecting of this condition and thus to similarity errors. As a consequence, the dispersion that takes place in such wakes is not modelled. We have developed a simple model based on temporal autocorrelation, validated in the academic case of flow around a cylinder.



Instabilité de Von Kármán © Benoît Cuilhé, 2022.

Éléments de bibliographie

MIKUŽ, Blaž et TISELJ, Iztok, 2017. URANS prediction of flow fluctuations in rod bundle with split-type spacer grid. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 64, pp. 10-22.

SPIEGEL, Edward A. et VERONIS, Georgios, 1960. On the Boussinesq approximation for a compressible fluid. *The Astrophysical Journal*, mars 1960, vol. 131, pp. 442-447.

VENDEL, Florian, 2011. *Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels*. Thèse de doctorat : Mécanique, Énergétique, Génie civil et Acoustique. Écully : École Centrale de Lyon.

Florentin DANIEL

Élève ingénieur concours commun
Master Mécanique des fluides : fondements et applications,
École polytechnique

Promotion 2021

Début de doctorat réalisé à :
Laboratoire de physique, ENS

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Christophe GISSINGER, maître de conférences

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Damien VIOLEAU, enseignant, École des Ponts ParisTech, chercheur, EDF

Étude du transport turbulent dans les étoiles radiatives : l'instabilité de Tayler-Spruit

Mots-clés : magnétohydrodynamique, simulations numériques directes, stratification stable, turbulence

Contexte

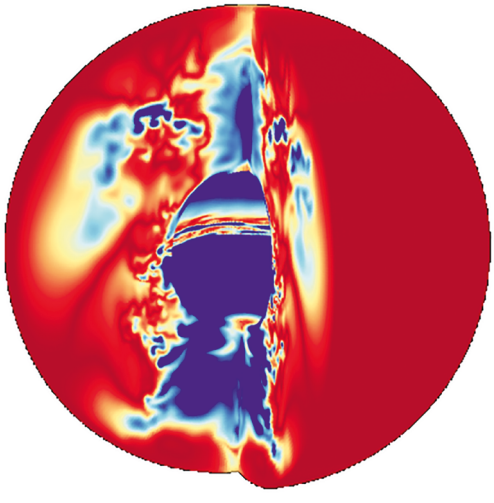
Ce projet de fin d'études présente le résumé de mes six premiers mois de thèse, commencée en septembre 2021 au LPENS, et qui s'intitule *Transformations énergétiques dans les systèmes hydrodynamiques astrophysiques*. Ceci fait suite à mon stage de M2 réalisé au sein de la même équipe et présente donc certains des travaux effectués pendant celui-ci. Ma thèse est réalisée sous la direction de Christophe Gissinger et Ludovic Petitdemange.

Missions et objectifs

Avant de pouvoir combiner approche théorique et simulations numériques en vue d'explorer un régime de paramètres différent, je me suis familiarisé avec ces nouveaux concepts et outils en reproduisant des résultats connus de la littérature. Cette première phase passée, j'ai pu engranger des résultats inédits.

Résumé

L'effet dynamo dans des objets astrophysiques stratifiés stables a longtemps été étudié aussi bien numériquement que théoriquement, mais ce n'est que récemment qu'un tel effet auto-entretenu a pu être observé *via* des simulations numériques directes (DNS) (Petitdemange *et al.*, 2022) de ce qui s'apparente à la dynamo de Tayler-Spruit (Spruit, 2002). Cette dernière est intéressante dans la mesure où elle maintient un champ magnétique en introduisant une source de turbulence dans une région *a priori* stable hydrodynamiquement. Nous étudions cette source de turbulence à la lumière du formalisme de champ moyen, et montrons que les coefficients qui en résultent pourraient aider à fermer la boucle dynamo. S'appuyant sur les données de Petitdemange *et al.* (2022) et de nombreuses nouvelles simulations numériques, nous apportons également des résultats intéressants en ce qui concerne le comportement des coefficients de transport dans ce régime stratifié stable.



Visualisation 3D du champ magnétique d'une dynamo dipolaire (intensité croissante vers le bleu) © Florentin Daniel, 2022.

A study of turbulent transport in radiative stars: the Tayler-Spruit instability

Keywords: magnetohydrodynamics, direct numerical simulations, stable stratification, turbulence

Context

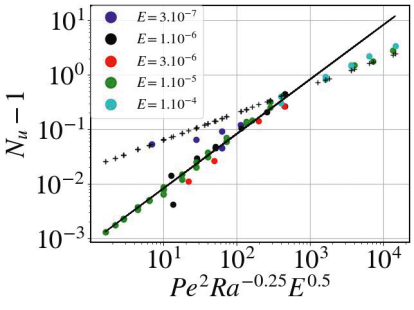
This PFE contains a summary of the work I conducted over the first six months of my PhD at Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure (LPENS) in Paris from September 2021 to February 2022, as well as the research project I conducted for my M2 year in Fluid Mechanics at Institut Polytechnique and Sorbonne Université in the same lab, under the supervision of Ludovic Petitdemange and Christophe Gissinger.

Missions and goals

During my PFE, I first had to study the topic at hand by reading the corresponding bibliography. I then reproduced some of the past results to familiarize myself with the numerical tools I had. Eventually, I was able to combine both a theoretical approach and numerical simulations to explore a new regime of parameters, which led me to interesting new results.

Abstract

Dynamo action in a stably stratified regime has long been investigated both numerically and theoretically for modelling MHD astrophysical objects such as stars, but it is only recently that such a regime could be found by running Direct Numerical Simulations (Petitdemange et al*., 2022). The so-called Tayler-Spruit dynamo interestingly maintains a magnetic field by generating a source of turbulence in the stable region. We investigate this source of turbulence in terms of mean-field formalism, and find that the resulting coefficients could help understand the dynamo loop. Using the data set of Petitdemange* et al. *(2022) and new simulations, we also obtain interesting results on the behaviour of both hydrodynamic and magnetic turbulent transport parameters in the stably stratified regime.*



Loi d'échelle du nombre de Nusselt thermique en fonction des nombres de Péclet Pe, Rayleigh Ra et Ekman E. La ligne continue correspond au scaling de l'abscisse, celle en pointillés à sa racine carrée. © Florentin Daniel, 2022.

Éléments de bibliographie

PETITDEMANGE, Ludovic, MARCOTTE, Florence et GISSINGER, Christophe, 2022. Theory of the hydromagnetic dynamo. *Science* [non publié].

SPRUIT, Henk C, 2002. Dynamo action by differential rotation in a stably stratified stellar interior. *Astronomy & Astrophysics*, janvier 2002, vol. 381, n° 3, pp. 923-932.

Jérémy KALFOUN

Élève ingénieur concours commu
Master of Science Advanced Aeronautical Engineering,
Imperial College London, Royaume-Uni

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
ICON Technology & Process Consulting

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Guillaume PIERROT, Principal Scientist

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Paul RAMBACH, responsable académique, département Génie mécanique et matériaux, École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Analyse de la méthode *overset* en CFD : interpolations, stabilité et conservation

Mots-clés : mécanique des fluides, CFD, méthode chimère, validation

Contexte

Le stage de fin d'études à l'Imperial College consiste à réaliser un projet de recherche en laboratoire ou en entreprise d'une durée de 4 mois. J'ai réalisé mon stage au sein de l'entreprise ICON CFD, qui développe une suite logiciel de CFD (Mécanique des fluides numérique). Les différentes applications concernent l'automobile (aérodynamique externe, refroidissement des freins...), l'aéronautique (turbomachinerie, acoustique...), l'énergie, *etc.*

Missions et objectifs

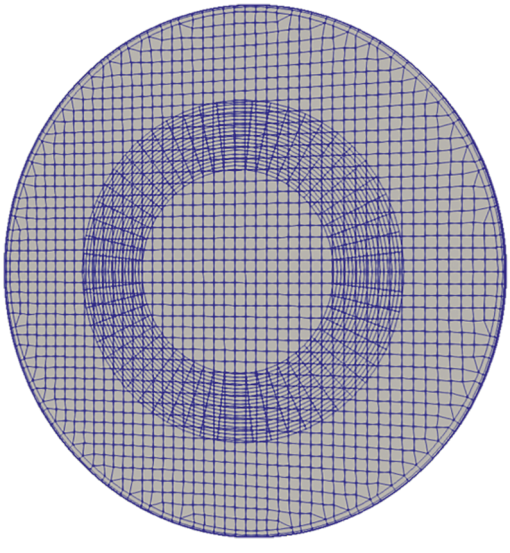
L'objectif du stage était d'évaluer les solveurs et interpolations existants afin d'en déduire les limitations de la méthode *overset* et de l'améliorer. Du développement a été réalisé afin de pouvoir utiliser des interpolations d'ordre élevé et de trouver les meilleures pratiques en termes de stabilité. Une étude sur la conservation dans le cadre de l'*overset* a été réalisée. Des cas tests fondamentaux ont été mis en place avec ICON CFD pour la validation comparant les résultats avec les données expérimentales et analytiques.

Résumé

L'*overset* est une méthode développée depuis une trentaine d'années. Elle consiste en la superposition de plusieurs maillages pour représenter des géométries complexes ou des géométries avec des mouvements relatifs entre différentes parties. Elle est répandue dans les solvers CFD, mais souvent, à l'état de recherche et développement. La méthode la plus utilisée consiste à réaliser des interpolations entre les différents maillages afin de fermer les équations.

Ce PFE conclut que la sensibilité de la méthode au maillage (alignement des cellules, ratio des tailles, ratio des volumes, *etc.*) est très importante. Il semble aussi que la méthode d'interpolation implémentée durant ce projet (méthode des moindres carrés d'ordre élevé) réduise bien la sensibilité à l'arrangement des cellules, mais puisse être dépassée par la sensibilité au maillage. Enfin, le manque de conservation de l'*overset* est aussi responsable de certaines erreurs sur les résultats. Une méthode pour intégrer la conservation à la méthode *overset* a été explicitée dans le rapport.

Finalement, l'utilisation de la méthode *overset* pour la production est prometteuse. Il faut, cependant, réussir à dépasser les limitations exposées. Les principales améliorations peuvent venir de l'augmentation de l'ordre de l'interpolation et de la prise en compte de la conservation.



Superposition des deux maillages pour le cas des cylindres de Taylor-Couette avec la méthode overset © Jeremy Kalfoun, 2021.

Analysis of the overset method for CFD: Interpolations, stability and conservation

Keywords: fluid mechanics, CFD, overset method, validation

Context

This PFE at Imperial College consists of a research project at a laboratory or a company for a period of 4 months. I did my internship at ICON CFD, which develops a CFD (Computational Fluid Mechanics) software suite. The different applications relate to fields such as automotive (external aerodynamics, brake cooling, etc.*), aeronautics (turbomachinery, acoustics,* etc.*), and energy.*

Missions and goals

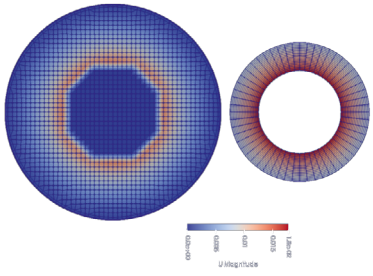
The objective of the internship was to evaluate existing solvers and interpolations in order to deduce the limitations of the overset method and improve it. Development was conducted in order to use high order interpolations and to find the best practices in terms of stability. A study on conservation with the overset was carried out. Fundamental test cases were set up with ICON CFD for validation, and the results compared with experimental and analytical data.

Abstract

The project title is "Analysis of the overset method in CFD: Interpolations, stability and conservation". The overset method is a method developed over the last thirty years and consists of the superposition of several meshes to represent complex geometries or geometries with relative movements between different parts. It is a popular method in CFD solvers, but often used in the research and development stage. The most widespread method consists in carrying out interpolations between the various grids in order to close the equations.

The main conclusions are:

- *The mesh sensitivity of the method (alignment of cells, ratio of sizes, ratio of volumes,* etc.*) is very important.*
- *The interpolation method implemented during this project (High order least squares method) is well suited to reducing the sensitivity to the arrangement of the cells, but is sometimes exceeded by the sensitivity to the mesh.*
- *The lack of conservation of the overhead is also responsible for certain errors in the results. A method for integrating conservation into the overset method is offered in the report.*
- *Finally, while the use of the overset method for production is promising, it is necessary to overcome the exposed limitations. Major improvements can result from an increase in the order of the interpolation and a proper accounting of the conservation.*



Vitesse de l'écoulement sur chacune des grilles pour le cas des cylindres de Taylor-Couette © Jeremy Kalfoun, 2021.

Éléments de bibliographie

BUNING, Pieter G. et GOMEZ, Reynaldo J., 2010. 20+ years of Chimera grid development for the space shuttle. *In*: AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS (AIAA). *10th Symposium on Overset Composite Grid and Solution Technology, Moffett Field*. 20-23 septembre 2010. Moffet Field, Californie : NASA Ames Research Center.

CHANDAR, Dominic D., 2018. Assessment of interpolation strategies and conservative discretizations on unstructured overset grids in OpenFOAM. *In*: AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS (AIAA). *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*. 8-12 janvier 2018. Kissimmee, Floride : Gaylord Palms.

WANG, Zhi Jian, HARIHARAN, Nathan et CHEN, Rangfu, 2001. Recent development on the conservation property of chimera. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, novembre 2001, vol. 15, n° 4, pp. 265-278.

Ingénierie mathématique et informatique

Applied Mathematics and Computer Science

Le département IMI spécialise des ingénieurs en deux ans sur des thématiques de modélisation et de simulation. Cela implique des connaissances mathématiques de haut niveau, une pratique de l'informatique et une maîtrise des outils classiques de la simulation et de la modélisation numérique.

Enjeux

L'augmentation conjointe des quantités de données et des puissances de calcul bouleverse les attentes de la société en général, et des entreprises en particulier, en matière d'informatique et de mathématiques :

- tous les secteurs liés à la société du numérique (véhicule autonome, robotique, traitement du langage, systèmes de recommandation sur Internet) mettent en œuvre des algorithmes de prise de décision qui utilisent des techniques de l'apprentissage statistique ;
- dans l'ingénierie des systèmes industriels, les modèles utilisés pour la simulation se complexifient parce que les besoins d'optimisation explosent. Ils doivent être couplés afin de prendre en compte des phénomènes complexes, de nature différente et permettre des simulations plus fiables ou plus riches, plus précises ou plus rapides ;
- les domaines d'applications se diversifient avec, notamment, la biologie et la médecine pour lesquels la simulation complète significativement les connaissances des experts ;
- les mondes de la finance et de l'assurance évoluent également sous l'influence des régulateurs (normes prudentielles), mais aussi, des situations nouvelles (risques liés aux variations climatiques) avec le traitement automatique des données des marchés.

La formation

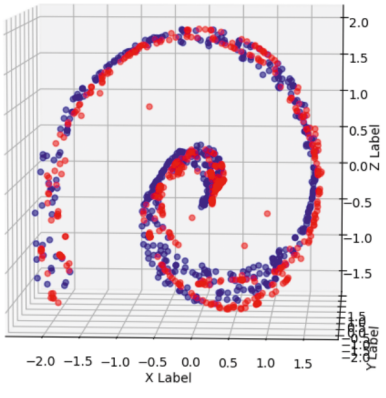
La formation du département s'organise autour de quatre parcours :

- le parcours « Probabilités et finance » permet la maîtrise des outils mathématiques et des méthodes numériques pour la modélisation de processus aléatoires (tels que le prix d'actifs financiers) et pour la gestion des risques ;
- le parcours « Modélisation, analyse et simulation » permet la maîtrise de l'étude théorique et numérique des problèmes modélisés par des équations provenant de domaines variés tels que la physique, les sciences de l'ingénieur, la chimie, la biologie, l'économie, ainsi que les méthodes de calcul scientifique ;
- le parcours « Optimisation » permet la maîtrise des méthodes, modèles et outils informatiques et mathématiques visant à optimiser des processus industriels, en particulier, ceux relevant de la *supply chain* ;
- le parcours « Vision et apprentissage » permet la maîtrise des concepts mathématiques en analyse, EDP, géométrie, probabilités et statistiques pour étudier les thèmes de recherche actuels en vision, audition, théorie de l'apprentissage et intelligence des données, imagerie médicale.

Chacun de ces parcours propose un choix de cours électifs, offerts par le département IMI ou par d'autres départements de spécialisation.

Il est possible d'obtenir parallèlement au diplôme d'ingénieur un master recherche :

- Modélisation, analyse et simulation (MAS),
- Mathématiques appliquées en finances (MAF),
- Probabilités et modèles aléatoires (PMA),
- Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
- Master parisien de Recherche opérationnelle – parcours Optimisation (MPRO).



Génération de données artificielles avec les GANs (*Generative Adversarial Networks*) © Adrien Le Franc, 2018.

Éric Duceau
Président
Department Head

Manon Baudel
Responsable académique
Academic Head

Sofiane Martel
Responsable académique à partir de juillet 2021
Academic Head since July 2021

Sandrine Guillerm
Inspectrice des études
Academic Advisor

Aurélie Mortier
Assistante polyvalente
Department Assistant

Via a two-year program, the Applied Mathematics and Computer Science (IMI) department educates engineers to build models, analyse their properties and perform numerical simulations. It offers a high level of mathematical training and solid knowledge in computer science.

Challenges

The rise of computing power, as well as access to large data sets are changing society's expectations with respect to mathematics and computer science:

- *All sectors related to the digital society (self-driving car, robotics, language processing, Internet recommendation systems) implement algorithms that use Machine Learning techniques;*
- *In industrial systems engineering, the models used for simulation are becoming more complex because the need for optimization is exploding. They must be coupled in order to take into account complex phenomena of different natures and allow more reliable or richer, more accurate or faster simulations;*
- *The fields of applications are diversifying, particularly in biology and medicine, where simulations significantly complement the knowledge of experts;*
- *The world of finance and insurance is also evolving under the influence of regulators (prudential regulation) but also of new situations (climate change risks) with the automatic processing of market data.*

Program structure

Four different programs are proposed:

- *Probabilities and Finance: to master the theory and numerical tools for the modelling of random processes (such as the price of financial assets) and for risk coverage;*
- *Modelling, Analysis and Simulation: to master the theoretical and numerical study of problems modelled by equations from various fields such as physics, engineering sciences, chemistry, biology, economics and scientific calculation methods;*
- *Optimisation: to master methods, models, mathematical tools aimed at optimising industrial processes, particularly those relating to the supply chain;*
- *The "Vision and Learning" program provides an advanced mathematical training in analysis, PDEs, geometry, probability, and statistics, used in the study of current research on vision, hearing, learning and information theory, biological and medical imaging.*

Each of these programs offers a choice of elective courses, offered by the department or by other departments.

It is possible to obtain a research master's degree in parallel to the engineering degree:

- *Modelling, Analysis and Simulation (MAS),*
- *Applied Mathematics in Finance (MFD),*
- *Probability and Random Models (PMA),*
- *Mathematics, Vision, Learning (MVA),*
- *Parisian Master's degree in Operational Research – Optimization (MPRO).*

Négociation autour du projet de département
© David Delaporte/École des Ponts ParisTech.

Laboratoires et chaires

Laboratories and chairs

Laboratoires • Laboratories

CERMICS

Centre d'enseignement et de recherche en Mathématiques et calcul scientifique. Thématiques : mathématiques appliquées, calcul scientifique, modélisation, optimisation.

Research Center in Mathematics and Scientific Computing. Themes: applied mathematics, scientific computing, modeling, optimization.

IMAGINE

Groupe de recherche de l'École des Ponts, rattaché au laboratoire d'informatique Gaspard Monge (université Gustave Eiffel). Thématiques : vision artificielle, apprentissage statistique, optimisation.

Research Group of Ecole des Ponts ParisTech, part of the Gaspard Monge Computer Science laboratory (Gustave Eiffel University). Themes: Computer vision, Machine Learning, Optimization.

Les projets de fin d'études
Final year projects

Apprentissage statistique · *Machine Learning*

LILY AMSELLEM | *Topic modelling* à partir de données *Twitter* dans le contexte des élections présidentielles
Topic modelling in the context of the 2022 French Presidential Elections using Twitter Data

ZINEB BOUZAABOUN | Développement d'un modèle comportemental unique
Development of a unique behavioral model

THOMAS CHABAL | Recherche arborescente Monte-Carlo guidée par la vision pour l'assemblage 3D
Visually-guided Monte-Carlo Tree Search for 3D assembly

SASHA COLLIN | *Deep Learning* interprétable pour l'imagerie cérébrale dans les maladies neurodégénératives
Interpretable Deep Learning for brain imaging in neurodegenerative disorders

THÉO GIRAUDON | Le *Deep Learning* à l'usage de la planification préopératoire de la chirurgie de l'épaule
Deep Learning for preoperative planning of shoulder surgery

JULIA LINHART | Inférence à base de simulateurs par réseaux de neurones : application en neurosciences
Simulation based inference with Deep Learning: applications in neuroscience time data

ALEXANDRE PEREZ | Apprentissage supervisé sur données incomplètes
Supervised learning on incomplete data

Modélisation numérique et simulation · *Numerical modelling and simulation*

ADRIEN COTIL | Modélisation mathématique du déplacement d'animaux
Mathematical modeling of animal movement

MARTIN GRAIVE | Contrôle de propagation d'une épidémie sur un réseau soumis à des contraintes de couplage
Controlling the propagation of an epidemic on a network subject to coupling constraints

JÉRÉMY LAURET | Instrumentation des SMR par méthodes de réduction de modèles
Positioning of SMR incore instrumentation using model order reduction

RÉGIS SANTET | Discrétisation de la dynamique de Langevin pour l'échantillonnage de mesures
Discretizing Langevin dynamics with multiplicative noise for sampling probability measures

Optimisation et recherche opérationnelle · *Optimization and operations research*

LÉO BATY | Replanification ferroviaire en temps réel par résolution hybride IA/RO
Real time railway replanification using AI/OR hybrid methods

LOUIS BOUVIER | Problèmes opérationnels et stratégiques d'acheminement de stocks d'emballages
Renault's continent-scale multi-attribute inventory routing problem

THIBAULT FLESSELLES | Amélioration de la résolution du problème de trajectoires
Improving the resolution of the expansion problem

Processus stochastiques et finance quantitative · *Stochastic processes and mathematical finance*

ANGELA ABDRAZAKOVA | Élaboration d'un cadre quantitatif pour le *scorecard* FX interne et l'intégration ESG
Building a quantitative framework for in-house FX scorecard and ESG integration

THIBAUT BOURDAIS | Application de méthodes de retournement de temps au contrôle stochastique
Time reversal of stochastic processes: an application to stochastic control problems

Vision artificielle · *Computer vision*

JEFFREY MAHOU | Localisation et classification de boîtes de médicaments dans des étalages de pharmacies
Locating and classifying boxes of medicinal products in pharmacies

CHIHEB EDDINE NAJJAR | Une approche d'apprentissage profond pour l'extraction de tableaux
A Deep Learning approach to table extraction

CHARBEL-RAPHAËL SÉGERIE | Techniques modernes de *Machine Learning* pour l'annotation de données
Modern Machine Learning techniques for data annotations

YOUVAL VANLAER | Super-résolution en microscopie à fluorescence
Image super-resolution in fluorescence microscopy

Lily AMSELLEM

Élève ingénieure concours commun
Master of Science Computing (AI & Machine Learning),
Imperial College London, Royaume-Uni

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Kynapse

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Victor BART, Manager Data

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Julien REYGNER, chercheur, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Topic modelling à partir de données *Twitter* dans le contexte des élections présidentielles

Mots-clés : *topic modelling*, *Twitter*, NLP, *zero-shot classification*

Contexte

Pour mon projet de fin d'études, j'ai occupé un poste de consultante *data scientist* au sein de Kynapse, cabinet de conseil en *data* et stratégie digitale.

En parallèle de cette mission, j'ai travaillé à un projet de R&D de *topic modelling* sur les *tweets* des candidats à la présidentielle.

Missions et objectifs

En tant que *data scientist*, j'ai travaillé sur une mission de traitement de données sur des maladies rares.

En parallèle de mon poste de consultante *data scientist*, mon projet de fin d'études portait sur un projet de R&D de *topic modelling*. J'ai appliqué un algorithme de *topic modelling* (CorEx) aux publications *Twitter* 2021 des candidats à la présidentielle. Il s'agissait de modéliser les grandes thématiques abordées par les candidats et de les comparer sur la base de leur expression sur *Twitter*.

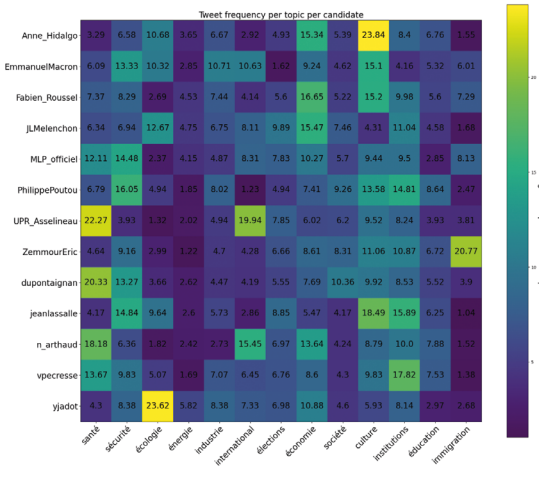
Résumé

Les réseaux sociaux sont un nouveau terrain de jeu où sont générées d'énormes quantités de données textuelles, couvrant un large éventail de sujets et émanant de nombreuses sources différentes. Un grand nombre de ces données est accessible au public et peut être analysé pour en tirer des enseignements sur les événements politiques actuels. Dans le contexte des élections présidentielles françaises de 2022, une partie de la campagne s'est déroulée sur *Twitter*, réseau sur lequel les candidates réagissent aux événements et interagissent avec leur électorat.

Un projet de R&D chez Kynapse consistait à analyser les sujets abordés par les candidats.

Nous avons collecté leurs *tweets* de l'année 2021 pour analyser leur contenu et appliquer des techniques de *topic modelling*. Les sujets étudiés étaient des thèmes au centre du débat public français pour les élections de 2022. Après le prétraitement et le nettoyage des *tweets*, nous avons réalisé des expériences avec deux techniques de *topic modelling* : CorEx, un modèle non supervisé, et un *transformer* pré-entraîné de la bibliothèque Hugging Face pour effectuer de la classification de *tweets* en mode *zero-shot*.

Nos expériences ont montré que CorEx a de bonnes performances pour faire du *topic modelling* sur des *tweets*, et que l'utilisation d'un *transformer* pré-entraîné en mode *zero-shot* ne permet pas d'obtenir des performances suffisantes sur ces données. L'utilisation d'un tel modèle nécessiterait de réaliser un *fine-tuning* sur un plus large *data set* de *tweets* en français.



Distribution thématique des tweets publiés par les candidats sur *Twitter*
© Lily Amsellem, 2022.

Topic modelling in the context of the 2022 French Presidential Elections using Twitter Data

Keywords: topic modelling, NLP, transformer, Twitter data

Context

For my end-of-studies internship, I worked as a data scientist at Kynapse, a consulting firm which specializes in data science and AI.

Parallel to my mission as a data science consultant, I worked on a topic modelling R&D project for my PFE.

Missions and goals

Parallel to my mission as a data science consultant, I worked on a topic modelling R&D project which aimed at analyzing the topics evoked on Twitter by the candidates of the French presidential election. I applied Natural Language Processing techniques such as CorEx and transformers.

Abstract

Social networks are a new playground where huge amounts of textual data are generated, covering a wide range of topics and emanating from many different sources. Much of this data is publicly available and can be analyzed to draw insights into current political events. In the context of the 2022 French presidential elections, much of the candidates' campaigning took place on Twitter, where they react to events and interact with their electorate.

This analysis initiated an R&D project at Kynapse, where we focused on the topics discussed by the candidates in the 2022 French presidential election.

We collected the tweets of 13 candidates over the year 2021 to analyze their content and apply topic modelling techniques. The topics studied were at the center of the French public debate for the 2022 elections. After pre-processing and cleaning the tweets, we performed experiments with two topic modelling techniques: CorEx, an unsupervised model, and a pre-trained transformer from the Hugging Face library to perform zero-shot classification of tweets.

Our experiments have shown that CorEx has good performance for topic modelling on tweets, and that the use of a pre-trained transformer in a zero-shot fashion did not allow sufficient performance on these data. The use of such a model would require fine-tuning on a larger data set of tweets in French.

Éléments de bibliographie

GALLAGHER, Ryan J., REING, Kyle, KALE, David *et al.*, 2017. Anchored correlation explanation: Topic modeling with minimal domain knowledge. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, vol. 5, pp. 529-542.

YIN, Wenpeng, HAY, Jamaal et ROTH, Dan, 2019. Benchmarking zero-shot text classification: Datasets, evaluation and entailment approach. *preprint arXiv* [en ligne]. Disponible sur : arXiv:1909.00161.

Zineb BOUZAABOUN

Élève ingénieure concours commun
Parcours Probabilités et finance

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Société Générale

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Miao Miao WANG, chef de projet Data Scientist

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Benjamin JOURDAIN, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Développement d'un modèle comportemental unique

Mots-clés : *Machine Learning*, données, modélisation, apprentissage supervisé, interprétabilité

Contexte

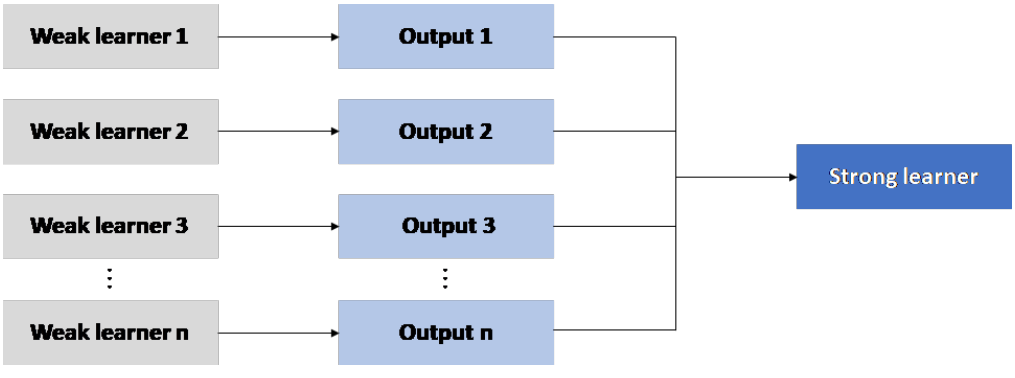
Au sein de la direction des risques du groupe Société Générale, le département MOD (Modèles de Risque et de Capital) est en charge de la définition des méthodes de modélisation des risques, à l'exception des risques de marché. Cela inclut, entre autres, les modèles de risque sur les portefeuilles de crédit Wholesales (notation/PD, LGD, CCF) et les modèles de provisions collectives sur le risque de crédit.

Missions et objectifs

Le but de ce projet de fin d'études (PFE) était de construire un modèle de PD (Probabilité de défaut) en utilisant différents algorithmes de *Machine Learning* (forêts aléatoires, XGBoost, réseaux de neurones). Après l'analyse des données et la construction des variables, il fallait construire et calibrer les modèles, les évaluer, les comparer et interpréter leurs résultats.

Résumé

Au sein de l'équipe de modélisation de risque de crédit, le projet de fin d'études avait pour but de construire un modèle de PD (Probabilité de défaut) en utilisant les données à disposition du département et en appliquant des algorithmes de *Machine Learning* (forêts aléatoires, XGBoost, réseaux de neurones). Il fallait tester plusieurs méthodes, les évaluer et comparer leurs résultats, puis proposer des méthodes d'interprétation des résultats fournis par les modèles, car il est primordial d'en comprendre les processus internes dans le domaine bancaire. Pour cela, des méthodes d'interprétabilité ont été explorées pour mettre au clair les résultats obtenus par les modèles utilisés afin de pouvoir les comprendre et les expliquer aux équipes d'audit, mais aussi pour fournir des pistes d'amélioration des modèles pour le futur.



Ensemble Learning © Zineb Bouzaaboun, 2021.

Development of a unique behavioral model

Keywords: Machine Learning, models, supervised learning, data, interpretation

Context

Within the risk department of Société Générale, the MOD (Risk and Capital Models) department is in charge of defining risk modeling methods, with the exception of market risks. This includes, but is not limited to, risk models on wholesale credit portfolios (rating/PD, LGD, CCF) and collective provision models on credit risk.

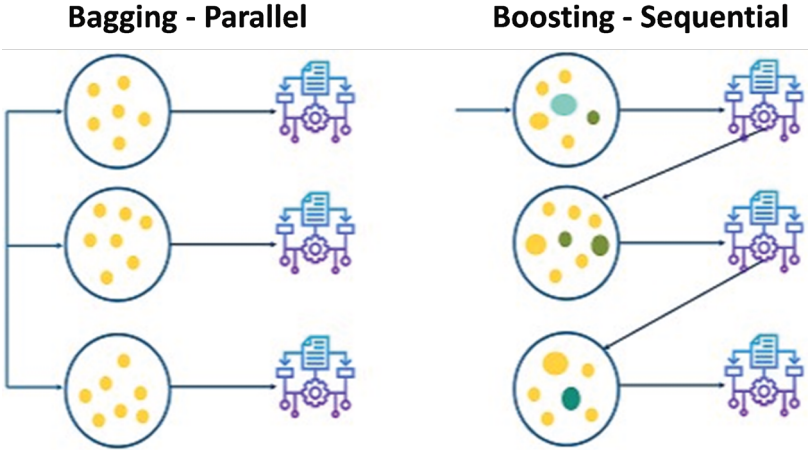
Missions and goals

The goal of the internship was to build a solid PD (Probability of Default) model using different Machine Learning algorithms (Random Forests, XGBoost, Neural Networks). The first part of the internship was dedicated to data analysis and the construction of variables, whereas the second part was more focused on the construction and calibration of models, their evaluation and comparaison, and the interpretability of the results.

Abstract

The exposure to credit risk continues to be one of the major problems faced by banks and other financial institutions. Credit risk can be defined as the potential that a bank counterparty fails to repay a loan or meet its contractual obligations. To safeguard the banks' solvency and ensure their economic stability, regulators require that banks have enough cash reserves with which they can cover their credit risk.

The internship was dedicated to the construction of a solid PD model that would have a good accuracy but also be interpretable and easily explained to the audit teams. By estimating the probabilities of default of counterparties, banks and financial institutions are able to assign ratings that evaluate the credit risk of an entity. A risk rating model is a key tool in the banking sector as it gives creditors, analysts, and portfolio managers a rather objective way of ranking borrowers based on their creditworthiness and default risk.



Bagging VS Boosting © Zineb Bouzaaboun, 2021.

Thomas CHABAL

Élève ingénieur concours commun
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
INRIA (équipe-projet WILLOW)

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Jean PONCE, Cordelia SCHMID, directeur / directrice de recherche

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Gül VAROL, chercheuse, LIGM, École des Ponts ParisTech

Recherche arborescente Monte-Carlo guidée par la vision pour l'assemblage 3D

Mots-clés : robotique, vision artificielle, recherche arborescente Monte-Carlo, apprentissage, assemblage 3D

Contexte

La robotique et la vision artificielle gagnent en maturation au fur et à mesure que des progrès importants sont réalisés en matière de contrôle et d'apprentissage profond. Construire des systèmes robotiques intelligents capables d'interagir avec leur environnement nécessite de faire communiquer ces deux domaines. Pourtant, très peu de connexions existent aujourd'hui entre eux.

Missions et objectifs

Dans cette visée de mise au point de tels systèmes intelligents, ce stage de fin d'études s'intéressait spécifiquement à l'assemblage automatisé de structures 3D avec un bras robotique, un sujet de recherche prometteur dont les applications pourraient être en assemblage de meubles ou en automatisation de chantiers de construction. L'objectif était de construire une structure avec un robot à partir d'une seule image de la structure cible.

Résumé

Aujourd'hui, les systèmes de vision sont basés sur des réseaux de neurones, très efficaces sur une multitude de tâches mais faisant beaucoup d'erreurs sur des images réelles et, surtout, manquant d'interprétabilité. À l'inverse, la robotique est fondée sur des mathématiques et une physique rigoureuse répondant à des exigences de certification et d'explicabilité, mais manque d'adaptabilité à de nouveaux environnements. Ces deux domaines ont des philosophies différentes et leur intersection a été très peu explorée jusqu'à présent.

Dans ce projet, nous avons élaboré une nouvelle méthode exploitant simultanément l'estimation de poses 6D d'objets sur des images, des outils classiques de *task planning* (STRIPS), l'optimisation convexe, le MCTS et la physique.

D'abord, l'estimation de pose sur l'image objectif extrait les objets à assembler ainsi que leurs poses. Cependant, la vision étant sensible aux occlusions, des objets ne sont pas vus lors de cette première étape.

Nous calculons alors un plan d'assemblage haut niveau de notre structure cible grâce au MCTS et aux opérateurs STRIPS. Cette recherche est guidée par des considérations bas niveau, *via* la résolution d'un problème d'optimisation convexe rassemblant des prédicats STRIPS, les poses précédemment récupérées et des contraintes de stabilité structurelle. Ce module d'optimisation permet à notre méthode de générer un plan de construction prêt à l'emploi tout en étant robuste aux défaillances de la vision et en fournissant des garanties mathématiques et physiques de faisabilité et de stabilité.

Enfin, nous avons prouvé que notre méthode fonctionne sur un robot réel pour plusieurs tâches de complexité variable.

Our setup: the UR5 robotic arms observe the target on the left and reproduce it on the right © Thomas Chabal, 2021.

Visually-guided Monte-Carlo Tree Search for 3D assembly

Keywords: robotics, computer vision, Monte-Carlo tree search, Machine Learning, 3D assembly

Context

Robotics and computer vision are fields becoming more and more mature as important advances in control and Deep Learning are made. To build intelligent robotic systems that can interact with their environments, these two domains need to communicate with each other. However, very few connections exist between them today.

Missions and goals

This end-of-study internship aimed at taking a step towards the creation of such intelligent systems, focusing specifically on automated 3D structure assembly with a robotic arm, a promising research topic which may find applications in furniture assembly or automation of construction sites. Our goal was to build a structure with a robot given a single image of the target structure as input.

Abstract

Nowadays, most computer vision systems rely on deep neural networks which are very efficient on a wide range of tasks but present numerous imperfections on plenty of real life images and, more importantly, lack interpretability. Conversely, robotics is built on rigorous explicable mathematics and physics to meet certification requirements but lacks adaptability to new environments. These two domains have diverging philosophies and their intersection has barely been explored so far.

As part of this final year project, we developed a new method leveraging simultaneously 6D object pose estimation on images, classical task planning tools (STRIPS), convex optimization, MCTS, and physics.

First, pose estimation performed on the target image extracts the objects to assemble and their poses. However, as occlusion impedes visual systems, several objects are not retrieved during this first step.

We then compute a high-level assembly plan for our target structure thanks to MCTS and STRIPS operators. We guide this search with low-level considerations, which is made possible by solving a convex optimization problem mixing high-level STRIPS predicates, previously retrieved poses, and physical stability constraints. This optimization module ensures that our method eventually outputs a ready-to-use construction plan jointly with all the object poses, while being robust to failures of vision and providing us with mathematical and physical guarantees of feasibility and stability.

Finally, we test and confirm our method on a real robot with novel construction tasks of various complexities.

Target structure including 5 unknown colored blocks (back) and its reconstruction by our robot (front)
© Thomas Chabal, 2021.

Éléments de bibliographie

FIKES, Richard E. et NILSSON Nils J., 1971. Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, vol. 2, n° 3-4, pp. 189-208.

LABBÉ, Yann, ZAGORUYKO, Sergey, KALEVATYKH, Igor *et al.*, 2020. Monte-Carlo Tree Search for Efficient Visually Guided Rearrangement Planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, avril 2020, vol. 5, n° 2, pp. 3715-3722.

RUSSELL, Stuart et NORVIG, Peter, 2010. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson, 1 152 p.

Sasha COLLIN

Élève ingénieur concours commun
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2020

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Inserm DR Paris 6/12 - Laboratoire ARAMIS

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Olivier COLLIOT, directeur de recherche

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Maria VAKALOPOULOU, enseignant, CentraleSupélec, université Paris-Saclay

Deep Learning interprétable pour l'imagerie cérébrale dans les maladies neurodégénératives

Mots-clés : interprétabilité, *Machine Learning*, multi-branch CNN, IRM, troubles mentaux

Contexte

Ce stage de recherche s'est déroulé à l'Institut du Cerveau de Paris. J'ai fait partie de l'équipe Aramis, travaillant sous la direction d'Olivier Colliot, co-responsable de l'équipe Aramis et directeur de recherche au CNRS.

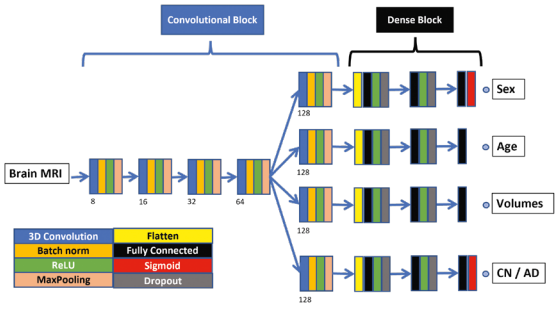
Missions et objectifs

Ma première mission concernait la rédaction d'un chapitre complet pour le prochain ouvrage d'Olivier Colliot, *Machine Learning for Brain Disorders*, dont la publication est prévue en 2022. Ce chapitre donne un large aperçu de l'interprétabilité de l'apprentissage automatique et de son application dans le domaine de l'analyse des troubles cérébraux.

Pour ma deuxième mission, j'ai travaillé sur la maladie d'Alzheimer en utilisant des données d'imagerie par résonance magnétique (IRM). L'objectif de ce projet était de comparer les régions du cerveau caractérisant la maladie d'Alzheimer à celles identifiant le processus de vieillissement.

Résumé

L'interprétation des méthodes de *Machine Learning* est une tâche cruciale pour accroître la confiance dans les modèles de prise automatique de décision médicale. Dans cette étude, nous présentons d'abord un large aperçu de l'interprétabilité du *Machine Learning* et son application dans le domaine de l'analyse des troubles du cerveau. Ensuite, nous entraînons un réseau neuronal convolutif (CNN) à plusieurs branches pour détecter simultanément la maladie d'Alzheimer et prédire l'âge, le sexe biologique et les volumes cérébraux des sujets à partir de données d'imagerie par résonance magnétique (IRM) cérébrale 3D pondérées en T1. Nous appliquons l'algorithme Grad-CAM pour déterminer les régions les plus importantes pour les différentes prédictions. Nous avons mis en évidence des régions discriminantes communes à l'âge et à la maladie d'Alzheimer, ainsi que de forts biomarqueurs pour le sexe biologique. Les prédictions relatives aux volumes et au sexe ont ensuite été utilisées pour vérifier le bon fonctionnement interne du modèle. Enfin, nous relativisons nos résultats, car ils sont tout au plus aussi bons et fiables que les performances de notre modèle.



4-branch convolutional neural network used to simultaneously predict age, sex, brain volumes and Alzheimer's disease © Sasha Collin, 2021.

Interpretable Deep Learning for brain imaging in neurodegenerative disorders

Keywords: interpretability, Machine Learning, multi-branch CNN, MRI, brain disorders

Context

This research internship took place at the Paris Brain Institute. I was part of the Aramis team, working under the supervision of Olivier Colliot, Aramis team co-leader and Research Director at CNRS.

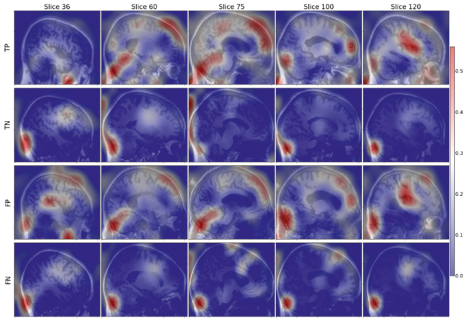
Missions and goals

My first mission was to write a full chapter for Olivier Colliot's next book, Machine Learning for Brain Disorders, *scheduled to be published in 2022. The chapter gives a broad overview of Machine Learning interpretability and its application in the field of brain disorders analysis.*

For my second mission, I worked on Alzheimer's disease using Magnetic Resonance Imaging (MRI) data. The aim of this project was to compare the brain regions associated with Alzheimer's disease to those associated with the ageing process.

Abstract

Interpreting Machine Learning methods is a crucial task to increase trust in automatic medical decision making models. In this study, we first present a broad overview of Machine Learning interpretability and its application in the field of brain disorders analysis. Then, we train a multi-branch convolutional neural network (CNN) to simultaneously detect Alzheimer's disease and predict the age, biological sex, and brain volumes of subjects base on 3D T1-weighted brain Magnetic Resonance Imaging (MRI) data. We apply the Grad-CAM algorithm to determine the most important regions driving the different predictions. We were able to demonstrate common discriminative regions for both age and Alzheimer's disease, as well as strong biomarkers for biological sex. Brain volumes and sex predictions were further used as sanity checks to verify the good inner working of the model. Finally, we put our results in perspective as they are (supposedly) only as good and reliable as our model performances.



Average attribution maps obtained for the prediction of Alzheimer's disease on the test set © Sasha Collin, 2021.

Éléments de bibliographie

XIE, Ning, RAS, Gabrielle, VAN GERVEN, Marcel *et al.*, 2020. Explainable deep learning: A field guide for the uninitiated. *preprint arXiv* [en ligne]. arXiv: 2004.14545.

Théo GIRAUDON

Élève ingénieur concours commun
Master Modélisation, analyse, simulation (MAS), Sorbonne Université
et École des Ponts ParisTech

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Imascap

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Manuel URVOY, R&D Lead Engineer

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pascal MONASSE, chercheur, LIGM, IMAGINE, enseignant,
École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidentiel

Le *Deep Learning* à l'usage de la planification préopératoire de la chirurgie de l'épaule

Mots-clés : arthroplastie, planification automatique, segmentation, recalage, épaule

Contexte

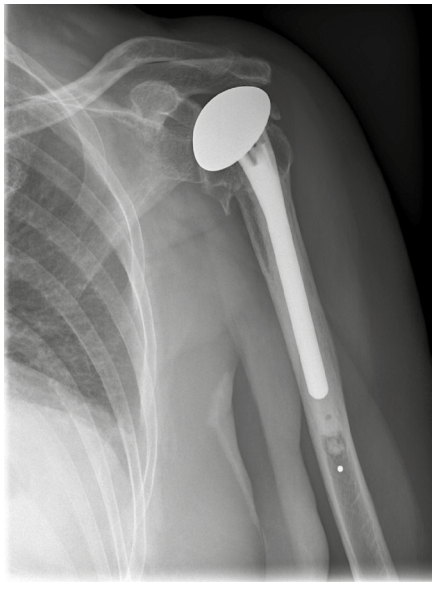
Avec l'âge, l'articulation de l'épaule peut présenter une arthrose. Il s'agit d'une usure, voire une disparition du cartilage, entraînant des douleurs et une réduction de la capacité de mouvement. Une des solutions chirurgicales consiste en la pose d'une prothèse, qui est un ensemble de composants artificiels remplaçant les surfaces en contact dans l'articulation. L'opération correspondante, l'arthroplastie de l'épaule, peut être planifiée par le chirurgien préalablement à son exécution afin de déterminer le type de prothèse le mieux adapté à la pathologie du patient et son positionnement optimal. Pour faciliter cette planification pré-opératoire, l'entreprise brestoise Imascap propose un logiciel, dénommé BluePrint. Référence dans ce domaine, il est très largement utilisé : plus de 70 000 planifications ont été réalisées depuis sa commercialisation par 3 400 chirugiens de 30 pays différents.

Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études (PFE) étudie une piste de recherche visant à ajouter une nouvelle fonctionnalité dans BluePrint : l'auto-planning. Il permettrait, à partir d'un scanner de l'épaule d'un patient, de proposer une planification au chirurgien, et ce, de manière automatique. Le chirurgien gagnerait donc du temps et, s'il est peu expérimenté à la planification pré-opératoire, cela lui montrerait comment un expert aurait pu procéder. Des ingénieurs de recherche d'Imascap ont commencé à développer cet outil et une solution déjà performante existe, mais seulement pour certains types de prothèses. En utilisant des technologies liées au *Deep Learning*, j'ai cherché à concevoir un auto-planning efficace pour tout le catalogue de prothèses existant. J'ai pour cela pu bénéficier de la très grande base de données constituée de planifications effectuées par des chirurgiens sur BluePrint.

Résumé

En couplant des techniques basées sur le *Deep Learning* à des algorithmes de traitement d'images tridimensionnelles, j'ai abouti à une solution aux performances encourageantes, tant en termes de pertinence de la planification proposée que vis-à-vis de son temps d'exécution. Cette solution a aussi le mérite de pouvoir s'adapter presque sans modification à n'importe quelle autre articulation du corps humain si tant est que l'on ait à disposition suffisamment de planifications déjà réalisées par des chirurgiens. Ayant été embauché en CDI dans l'entreprise, je m'attèle désormais à intégrer cette solution dans le logiciel.



Prothèse d'épaule © Lucien Monfils, 2011 (source : Wikipedia Commons).

Deep Learning for preoperative planning of shoulder surgery

Keywords: arthroplasty, automatic planning, segmentation, registration, shoulder

Context

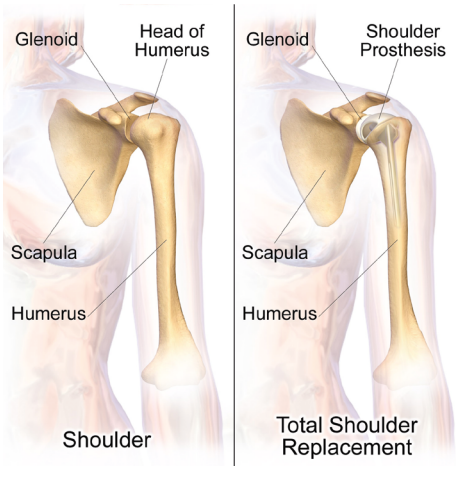
With age, the shoulder joint can present osteoarthritis, which consists in a deterioration or even a disappearance of the cartilage, leading to pain and a reduction in the ability to move. A surgical solution to this condition is the installation of a prosthesis, which is a set of artificial components that replaces the surfaces in contact in the joint. The corresponding operation, shoulder arthroplasty, can be planned by the surgeon prior to its execution in order to determine the type of prosthesis best suited to the patient's pathology and its optimal positioning. To facilitate this preoperative planning, Imascap, a company based in Brest, France, has developed a software program called BluePrint, which has become a reference in this field, as evidenced by its widespread use: more than 70,000 plans have been carried out by 3,400 surgeons from 30 different countries since it was first marketed.

Missions and goals

My work during this Final Year Project was to study a research track aimed at adding a new functionality to BluePrint, namely auto-planning, which would automatically propose a planning to the surgeon based on a CT scan of a patient's shoulder. The surgeon would thus save time and, if he is not very experienced in pre-operative planning, would be able to see how an expert might have proceeded. Imascap research engineers have started to develop this tool and a successful solution already exists, but only for certain types of prostheses. Using technologies related to Deep Learning, I tried to design an efficient auto-planning for the whole catalog of existing prostheses. In so doing, I was able to benefit from the very large database of planning performed by surgeons on BluePrint.

Abstract

By coupling techniques based on Deep Learning with 3D image processing algorithms, I have come up with a solution with encouraging performances, both in terms of relevance of the proposed planning and its execution time. This solution also has the merit of being adaptable almost without modification to any other joint of the human body, provided the availability of enough plans already performed by surgeons. Having been hired in the company on a permanent basis, I am now working on integrating this solution into the software.



Before and after a shoulder prosthesis © Bruce Blaus, 2017 (source : Wikipedia Commons).

Julia LINHART

Élève ingénieure concours commun
Parcours Vision et apprentissage
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2020

Début de doctorat réalisée à :
INRIA Saclay, Équipe Parietal

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Alexandre GRAMFORT, directeur de recherche HDR

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Julien REYGNER, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

Inférence à base de simulateurs par réseaux de neurones : application en neurosciences

Mots-clés : inférence bayésienne sans vraisemblance, estimation de densité conditionnelle, réseaux de neurones, simulateurs stochastiques, neurosciences

Contexte

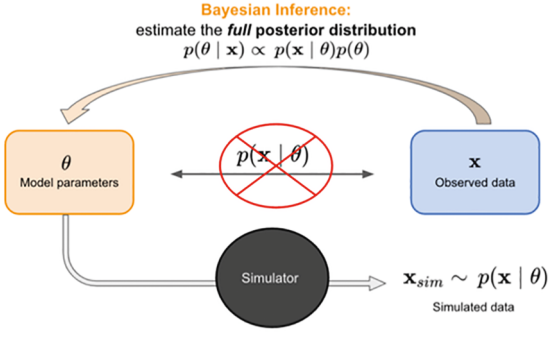
Au sein de l'École doctorale Sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC) de l'université Paris-Saclay, ce doctorat est financé par l'une des quatre bourses Jean-Pierre Aguilar de la Fondation CFM pour la recherche. Ce projet de fin d'études (PFE) porte sur les quatre premiers mois de ma thèse.

Missions et objectifs

L'objectif de cette thèse est de développer de nouveaux algorithmes SBI en tirant profit des avancées récentes en *Deep Learning* pour inverser des simulateurs cérébraux complexes. Le projet de ce PFE consiste en un premier temps dans l'extension des travaux récents des deux directeurs de thèse. Il s'agit de résoudre les problèmes d'indétermination liés au couplage de certains paramètres en exploitant la structure hiérarchique du modèle probabiliste.

Résumé

Dans le cadre d'une formation d'ingénieur orientée vers la recherche en mathématiques appliquées et informatique, mes derniers projets académiques se sont concentrés sur les nouvelles méthodes de *Deep Learning* pour le traitement de signaux bio-médicaux. Passionnée par ces sujets, j'ai récemment commencé un doctorat en neurosciences computationnelles à l'INRIA Saclay. L'objectif de mon projet de recherche est de développer de nouveaux algorithmes combinant *Deep Leaning* et programmation probabiliste pour inverser des simulateurs stochastiques complexes du cerveau. Une approche prometteuse s'appuie sur les avancées récentes des méthodes d'inférence bayésienne sans vraisemblance (LFI) – ou inférence à base de simulateurs (SBI), qui tirent parti des progrès de l'apprentissage profond (en utilisant des *Conditional Neural Density Estimators*) pour approcher la distribution *a posteriori* sur l'ensemble des paramètres du simulateur. Cela permet de quantifier les incertitudes et visualiser les dépendances ambiguës de certains paramètres, typiques de la dynamique stochastique et non linéaire de l'activité neuronale, et peut finalement amener à de nouvelles découvertes scientifiques. Les premiers mois de ma thèse ont principalement consisté en une recherche documentaire exhaustive sur les différentes composantes du sujet, ainsi qu'une première soumission de conférence présentant notre méthode et quelques résultats expérimentaux, avec une application à des données réelles de séries temporelles en neurosciences, c'est-à-dire des signaux électriques observés par électroencéphalographie (EEG).



Bayesian Inference of stochastic simulators with intractable likelihoods
© Julia Linhart, 2022.

Simulation based inference with Deep Learning: application to neuroscience time series data

Keywords: likelihood free Bayesian Inference, conditional density estimation, neural networks, stochastic simulators, neuroscience

Context

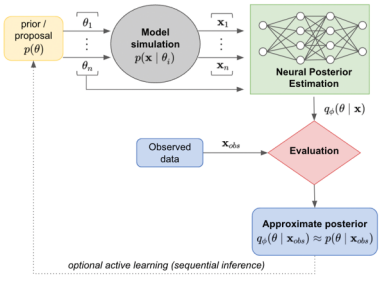
My PhD at the Doctoral School ED STIC, Université Paris-Saclay, is financed by one of the four Jean-Pierre Aguilar scholarships of the CFM Foundation for Research. This PFE project covers the first four months of my thesis work.

Missions and goals

The objective of the thesis will be to develop new SBI algorithms based on recent advances in Deep Learning to reverse complex brain simulators. The PFE project extends the recent work of the two thesis supervisors. The aim is to solve the indeterminacy problems linked to the coupling of certain parameters by exploiting the hierarchical structure of the probabilistic model.

Abstract

My academic path has combined engineering and research-oriented training in the fields of Applied Mathematics and Computer Science, with a strong focus on novel Deep Learning methods for bio-medical signal processing. Passionate about these subjects, I have recently started a doctoral thesis in computational neuroscience at INRIA Saclay. The goal of my research project is to develop new algorithms combining Deep Leaning and probabilistic programming to invert complex stochastic simulators of the brain. A promising approach builds on the recent advances in Likelihood-Free Bayesian Inference (LFI) – or Simualtion-Based Inference (SBI), where Conditional Neural Density Estimators are used to estimate the full posterior distribution over the parameters of the simulator. The resulting approximate posterior can then be used to perform reliable causality analysis in neural activity: it allows to visualize intrinsic uncertainties or ambiguous dependencies in the parameter space that are typical for stochastic and non-linear neuronal dynamics, eventually leading to new scientific discoveries. This report will resume the first few months of my PhD, which mainly consisted of an exhaustive literature search about the different components of the thesis subject and a first conference submission presenting our method and some experimental results with an application to real neuroscience time-series data, i.e., electrical signals observed with electroencephalography (EEG).



Neural Posterior Estimation (NPE): SBI-method using Neural Networks to learn the posterior from simulated data
© Julia Linhart, 2022.

Éléments de bibliographie

CRANMER, Kyle, BREHMER, Johann et LOUPPE, Gilles, 2020. The frontier of simulation-based inference. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, décembre 2020, vol. 117, n° 48, pp. 30055-30062.

GONÇALVES, Pedro J., LUECKMANN, Jan-Matthis, DEISTLER, Michael *et al.*, 2020. Training deep neural density estimators to identify mechanistic models of neural dynamics. *Elife*, septembre 2020, vol. 9, e56261.

RODRIGUES, Pedro L. C., MOREAU, Thomas, LOUPPE, Gilles *et al.*, 2021. Leveraging Global Parameters for Flow-based Neural Posterior Estimation. *arXiv preprint* [en ligne]. arXiv: 2102.06477.

Alexandre PEREZ

Élève ingénieur concours commun
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
INRIA Saclay

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Gaël VAROQUAUX, directeur de recherche HDR, INRIA

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pascal MONASSE, chercheur, LIGM, IMAGINE, enseignant,
École des Ponts ParisTech

Apprentissage supervisé sur données incomplètes

Mots-clés : apprentissage supervisé, valeurs manquantes, imputation, NeuMiss, *benchmark*

Contexte

L'apprentissage supervisé sur des problématiques réelles fait presque systématiquement face au problème des valeurs manquantes, à savoir, des observations incomplètes dans les données. Bien que partielles, ces observations peuvent quand même être utilisées pour améliorer la prédiction. Une pratique courante consiste à imputer les valeurs manquantes avant d'apprendre un modèle prédictif sur les données ainsi complétées. Cependant, certains modèles prennent nativement en compte les valeurs manquantes. C'est le cas, par exemple, de Missing Incorporated in Attribute (MIA) qui ajoute le support des valeurs manquantes au modèle d'arbres, ou du réseau NeuMiss en régression.

Missions et objectifs

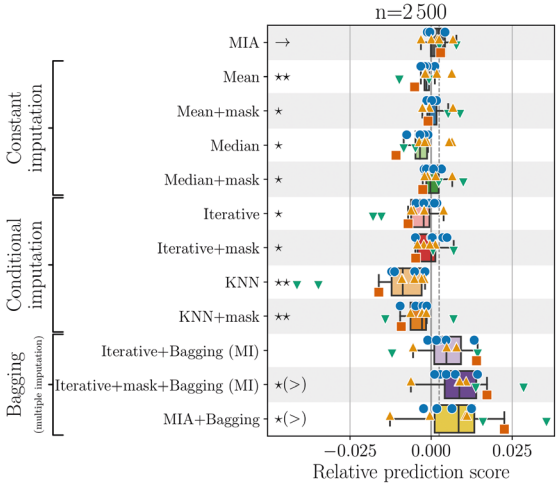
Ce stage se concentre sur deux problématiques. Premièrement, évaluer sur des données de santé réelles la performance de certaines approches qui gèrent les valeurs manquantes (imputation et support natif dans le modèle prédictif). Deuxièmement, adapter NeuMiss à la classification.

Résumé

J'ai d'abord évalué la qualité de prédiction et la complexité temporelle de MIA contre des méthodes d'imputation. J'ai observé que les méthodes complexes d'imputation peuvent améliorer la prédiction, comparativement à des imputations simples. Mais leur complexité temporelle les rend prohibitives sur des données de grande dimension. En lieu et place, un modèle d'arbres boostés supportant nativement les valeurs manquantes à l'aide de MIA fournit une prédiction de qualité en un temps raisonnable.

J'ai ensuite calculé les prédicteurs optimaux pour la classification binaire en présence de valeurs manquantes et adapté l'architecture du réseau NeuMiss en conséquence. J'ai évalué le modèle ainsi adapté et l'ai comparé à des méthodes d'imputation ainsi que l'algorithme expectation maximization. J'ai observé que le modèle adapté fournit une meilleure prédiction que les autres méthodes tout en étant robuste au mécanisme de valeurs manquantes, y compris Missing Not At Random. Cependant, le réseau ainsi adapté n'est pas calibré et une adaptation plus sophistiquée de son architecture est nécessaire pour obtenir un classifieur calibré.

Ce stage, particulièrement instructif, a conduit à deux contributions : la publication d'un manuscrit dans le journal académique *GigaScience* et une présentation à l'ECML Workshop.



Comparatif des performances de prédiction de la méthode MIA face aux méthodes d'imputation © Alexandre Perez, 2022.

Supervised learning on incomplete data

Keywords: supervised learning, missing values, imputation, NeuMiss, benchmark

Context

Supervised learning in real-world applications almost systematically faces the problem of missing values, i.e., incomplete observations in the dataset. Although incomplete, these observations can still be used to improve prediction.

A common practice consists of first imputing the missing values and then basing a predictive model on the completed dataset. However, some predictive models natively handle missing values: for example, Missing Incorporated in Attribute (MIA) adds support for missing values to tree-based methods, and NeuMiss in regression.

Missions and goals

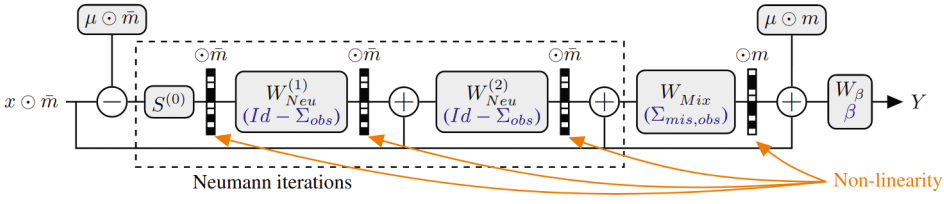
This internship had two objectives. The first was to benchmark missing-values approaches (imputation and native support) for predictive models on large real-world electronic health records. The second objective was to adapt NeuMiss to the classification setting.

Abstract

First, I investigated prediction accuracies and computational times of MIA against several imputation methods. I found that elaborate imputations can improve prediction compared to simple ones, but that their computational cost becomes prohibitive with large data. Instead, boosted-trees with native support for missing values via MIA provide a fast and well-performing predictive model.

Then, I derived optimal predictors for binary classification in the presence of missing values and adapted the NeuMiss network's architecture accordingly. I benchmarked the adapted model against imputation and the expectation maximization algorithm. I found that it predicts favorably while being more robust to the missingness mechanism, including Missing Not At Random settings. However, the adapted network is not calibrated and a more sophisticated adaptation of the architecture is required to obtain a calibrated classifier.

This internship was particularly instructive and led to two contributions: a publication in the academic journal GigaScience *and an oral presentation at the ECML workshop.*



Architecture of the NeuMiss network © Marine Le Morvan, Julie Josse, Thomas Moreau *et al.*, 2020, CC-BY-NC (source : HAL).

Éléments de bibliographie

JOSSE, Julie, PROST, Nicolas, SCORNET, Erwan *et al.*, 2019. On the consistency of supervised learning with missing values. *arXiv preprint* [en ligne]. arXiv: 1902.06931.

LE MORVAN, Marine, JOSSE, Julie, MOREAU, Thomas *et al.*, 2020. NeuMiss networks: differentiable programming for supervised learning with missing values. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, vol. 33, pp. 5980-5990.

PEREZ-LEBEL, Alexandre, VAROQUAUX, Gaël, LE MORVAN, Marine *et al.*, 2022 [in press]. Benchmarking missing-values approaches for predictive models on health databases. *GigaScience*.

Adrien COTIL

Élève ingénieur concours BCPST
Parcours Modélisation
Master Probabilités et modèles aléatoires (PMA), Sorbonne Université

Promotion 2020

Début de doctorat réalisée à :
INRAE, UMR MISTEA

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Bertrand CLOEZ, chargé de recherche

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Benjamin JOURDAIN, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

Modélisation mathématique du déplacement d'animaux

Mots-clés : modèle individu-centré, alignement, *Cucker-Smale*

Contexte

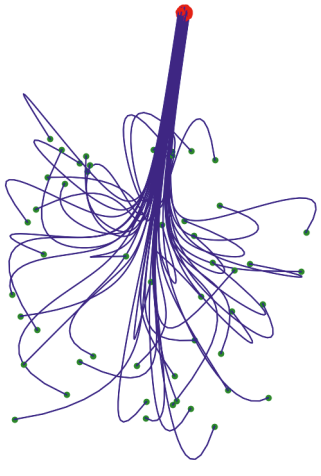
Ce projet de fin d'études (PFE) correspond aux 6 premiers mois de ma thèse. Elle est intitulée *Modélisation mathématique à partir de données issues de capteurs de proximités pour la détection précoce de pathologies chez les animaux d'élevage*, et réalisée à l'INRAE de Montpellier, au sein de l'UMR MISTEA. Elle est co-dirigée par Bertrand Cloez, chargé de recherche à l'UMR MISTEA et Jean-Baptiste Menassol, maître de conférences à l'UMR SELMET. Elle est le prolongement d'un stage de 6 mois, réalisé dans les mêmes conditions et sur le même sujet, et qui visait à étudier certaines bases théoriques liées au sujet *via* un premier travail bibliographique.

Missions et objectifs

Cette thèse vise, d'une part, à obtenir des informations sur le comportement social des animaux en condition d'élevage. D'autre part, nous souhaitons mettre en place un algorithme capable de reconnaître les animaux malades sur la base de leurs déplacements. Afin de répondre à ces deux objectifs, nous disposons de deux jeux de données. Le premier correspond aux déplacements de 150 vaches conduites en bâtiment et acquis sur plusieurs années par l'UMR Herbivores. Le second correspond à ceux de brebis conduites en plein air (50 au domaine du Merle et 20 au domaine de La Fage) et acquis sur plusieurs mois par l'UMR SELMET.

Résumé

Les productions animales sont un des secteurs agricoles les plus avancés en matière de TIC (technologies de l'information et de la communication), grâce, notamment, à de nouveaux capteurs de géolocalisation relevés quotidiennement et à haute fréquence. Ces productions pourraient ainsi en bénéficier en matière de santé connectée et de bien-être. L'usage de ces nouveaux capteurs génère un besoin de nouvelles méthodologies, comme la modélisation des interactions sociales à partir de données spatio-temporelles en incluant des inférences statistiques avancées, pour produire des informations prédictives plus précises et en temps réel. L'objectif de cette thèse est donc, d'une part, d'établir un modèle réaliste du déplacement des animaux, prenant en compte les différentes particularités des espèces étudiées et de l'environnement dans lequel elles évoluent. Elle entend, d'autre part, créer un modèle statistique à partir du modèle de déplacement et l'implémenter afin d'utiliser ces nouveaux capteurs haute fréquence. Les six premiers mois ont été consacré à la mise en place d'un modèle à partir de ceux étudiés pendant le stage et à l'élaboration d'une stratégie de calibration.



Simulation des "First Principals of Swarming" © Adrien Cotil, 2022.

Mathematical modeling of animal movement

Keywords: precision agriculture, multi-agent model, rupture detection

Context

The framework of this PFE corresponds to the first 6 months of my PhD, entitled Mathematical modelling from data from proximity sensors for the early detection of pathologies in farm animals, *which I am conducting at INRAE in Montpellier, within the UMR MISTEA, supervised by Bertrand Cloez from UMR MISTEA and co-supervised by Jean-Baptiste Menassol from UMR SELMET. The thesis was preceded by a 6-months internship, carried out under the same conditions and on the same subject, which aimed at preparing the thesis by doing a first bibliography work and by starting to study some theoretical bases related to the subject.*

Missions and goals

The PhD has two objectives. On the one hand, we wish to extract information on the social behaviour of animals under breeding conditions from data sets on their movements. On the other hand, we want to develop an algorithm which can recognise sick animals on the basis of their movements. In order to meet these two objectives, we have two data sets. The first, from ULB "CowView" on-board sensors, corresponds to the movements of 150 cows kept in buildings and is acquired over several years by the UMR Herbivores. The second, from on-board radio frequency sensors, corresponds to the movements of ewes kept in the open air (50 at the Domaine du Merle and 20 at the Domaine de La Fage) and was acquired over several months by the UMR SELMET.

Abstract

Animal production is one of the most advanced agricultural sectors in terms of ICT, with new geolocation sensors that are read daily and at high frequency. These productions could thus benefit in terms of connected health and well-being. The use of these new sensors creates the need for new methodologies, such as modelling social interactions from spatio-temporal data including advanced statistical inferences, to produce more accurate predictive information in real time. The objective of this thesis is therefore to establish a realistic model of animal movement, taking into account the different characteristics of the species studied and the environment in which they evolve, to create a statistical model from the movement model, and to implement it in order to use these new high frequency sensors.

La ferme expérimentale de Marcenat © Bertrand Cloez, 2021 (avec son autorisation).

Éléments de bibliographie

CARRILLO, José A., CHOI, Young-Pil et PEREZ, Sergio P., 2017. A review on attractive–repulsive hydrodynamics for consensus in collective behavior. *In:* BELLOMO, Nicola, DEGOND, Pierre et TADMOR, Eitan (eds.), *Active Particles, Volume 1. Advances in Theory, Models, and Applications*. S. L. : Birkhäuser, Cham, pp. 259-298.

CUCKER, Felipe et SMALE, Steve, 2007. Emergent behavior in flocks. *IEEE Transactions on automatic control*, mai 2007, vol. 52, n° 5, pp. 852-862.

MOTSCH, Sebastien et TADMOR, Eitan, 2011. A new model for self-organized dynamics and its flocking behavior. *Journal of Statistical Physics*, septembre 2011, vol. 144, n° 5, pp. 923-947.

Martin GRAIVE

Élève ingénieur concours commun
Parcours Vision et apprentissage
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Centre Borelli

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Pierre-Yves MASSE, chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Laurent OUDRE, enseignant, Centre Borelli

Contrôle de propagation d'une épidémie sur un réseau soumis à des contraintes de couplage

Mots-clés : modèles compartimentaux, méthode de la génération suivante, réseaux, optimisation, contrôle

Contexte

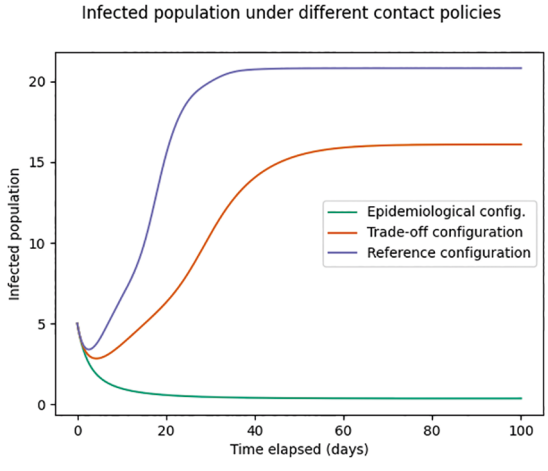
Dans une micro-communauté dont les membres interagissent afin d'effectuer une tâche spécifique, la survenance d'une épidémie met en péril l'accomplissement de la mission communautaire. Il est possible de restructurer les contacts entre les individus afin d'endiguer la propagation épidémique. Cependant, le remaniement a également un impact négatif sur l'opérationnalité de la micro-communauté.

Missions et objectifs

Sous l'impulsion du Service de Santé des Armées, le projet ONADAP, visant à développer un logiciel de visualisation et d'aide à la décision pour les structures de santé en période de crise sanitaire a été lancé en avril 2020. Il comprend un outil de modélisation de la propagation du SARS-CoV-2, ainsi qu'un système de comparaison de schémas d'organisation. Ce travail visait à fournir un algorithme robuste et modulable pour le logiciel.

Résumé

Nous avons étudié le processus de diffusion virale sur un graphe représentant les interactions entre individus ou groupes d'individus. La dynamique du signal épidémique était régie par un système d'équations différentielles ordinaires couplées inspirées de la littérature sur les modèles compartimentaux à métapopulations. Afin de limiter la propagation du virus, nous avions pour seul contrôle l'intensité (le poids) des liens entre les agents de l'organisation représentée par le graphe, cela traduisant une certaine capacité à isoler les individus ou les équipes. L'explosion ou non de l'épidémie dépendait du nombre de reproduction de base, lui-même fonction des paramètres épidémiologiques (constants) de la maladie et des poids des arêtes du graphe, que nous avons rendu différentiable par rapport à ce dernier. Une notion d'opérationnalité satisfaisant aux contraintes de fonctionnement de l'organisation était aussi introduite dans notre modèle et un critère de maintien de l'opérationnalité s'ajoutait à l'objectif d'endiguement. Il s'agissait donc de trouver une distribution des poids menant à un équilibre entre ces deux objectifs. Nous avons implémenté le modèle et la résolution du problème d'optimisation résultant, dans un code modulaire et tensorisé, capable *via* un système de clusterisation de s'adapter aux graphes de grande taille.



Simulations dans un graphe de 50 nœuds © Martin Graive, 2021.

Controlling the propagation of an epidemic on a network subject to coupling constraints

Keywords: compartmental models, next-generation method, networks, optimization and control

Context

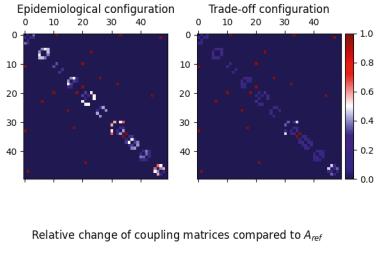
In a micro-community whose members interact to perform a specific task, the occurrence of an epidemic jeopardizes the accomplishment of the community mission. It is possible to restructure the contacts between individuals in order to stem the spread of an epidemic, which is desirable; however, the reshuffling also has a negative impact on the operationality of the micro-community.

Missions and goals

Under the impulse of the French Army Health Service, a project aiming at developing a visualization and decision support software for health structures during a health crisis was born in April 2020. Named ONADAP, it includes a tool for modeling the spread of SARS-CoV-2 as well as a system for comparing organization schemes. This work aimed to provide a robust and modular algorithm for the software.

Abstract

We studied the diffusion process of a virus on a graph representing the interactions between individuals or groups of individuals. The dynamics of the epidemic were governed by a system of coupled ordinary differential equations inspired by the literature on compartmental metapopulation models. In order to limit the propagation of the virus, we only controlled the intensity of the links between the agents of the organization represented by the graph, which reflects a certain capacity to isolate individuals or teams. The explosion or extinction of the epidemic depended on the basic reproduction number, itself a function of the (constant) epidemiological parameters of the disease and of the weights of the edges of the graph, and which we made differentiable with respect to the latter. A notion of operationality was also introduced in our model and a criterion to maintain operationality was added to the containment objective. We therefore had to find a distribution of weights that would lead to a balance between these two objectives. We implemented the model and the resulting optimization problem in a modular and tensorized code, able to adapt to large real-world graphs via *a clustering system.*



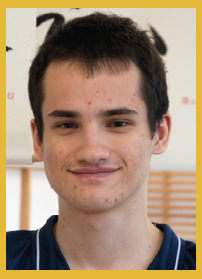
Modification du poids des arêtes par rapport à une situation « nominale » © Martin Graive, 2021.

Éléments de bibliographie

ARINO, Julien, 2009. Diseases in metapopulations. *In*: MA, Zhien, ZHOU, Yicang et WU, Jianhong (eds.). *Modeling and dynamics of infectious diseases*. pp. 64-122.

DIEKMANN, Odo, HEESTERBEEK, Johan A. P. et METZ, Johan A. J., 1990. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R 0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations. *Journal of mathematical biology*, février 1990, vol. 28, n° 4, pp. 365-382.

NOWZARI, Cameron, PRECIADO, Victor M. et PAPPAS, George J., 2016. Analysis and control of epidemics: A survey of spreading processes on complex networks. *IEEE Control Systems Magazine*, février 2016, vol. 36, n° 1, pp. 26-46.



Jérémy LAURET

Élève ingénieur concours commun
Parcours Modélisation
Master Modélisation, analyse, simulation (MAS), Sorbonne Université
et École des Ponts ParisTech

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
EDF Lab Paris-Saclay

Tuteur professionnel · *Organization Tutor* :
Angélique PONÇOT, ingénieure-chercheuse

Tuteur académique · *Academic Tutor* :
Virginie EHRLACHER, chercheuse, CERMICS, École des Ponts ParisTech

Instrumentation des SMR par méthodes de réduction de modèles

Mots-clés : petits réacteurs modulaires, instrumentation interne, réduction de modèles, assimilation de données

Contexte

Depuis 2017, EDF participe à la conception du petit réacteur modulaire Nuward (*Small Modular Reactor*), dont un premier design a été présenté en avril 2021. Bien qu'il soit basé sur la même technologie que les réacteurs en exploitation sur le parc électrique français, un grand nombre d'études sont menées afin d'en accroître la compacité, la sûreté et la simplicité de pilotage.

Missions et objectifs

On s'intéresse ici à la question du placement de capteurs dans un cœur de SMR Nuward.

Cela consiste, d'une part, à mettre en place une procédure de reconstruction de cartes de flux neutroniques à partir de mesures ponctuelles et, d'autre part, à optimiser la position de l'instrumentation afin d'assurer une reconstruction de qualité.

Des méthodes d'assimilation de données, qui associent un modèle numérique et un ensemble de mesures expérimentales, sont utilisées afin d'estimer l'état d'un système.

Le modèle numérique est généré par un algorithme de réduction de modèles, qui offre une alternative économe en temps de calcul aux codes de simulation neutronique.

Ainsi, l'objectif de ce travail est de comparer différentes méthodes de réduction de modèles en termes de précision, mais aussi de robustesse vis-à-vis du bruit dans les mesures et de perte d'instrumentation.

Résumé

À partir d'une base de données de cartes de flux générées par un code de simulation neutronique, les algorithmes de réduction de modèles utilisés dans le cadre de ce projet fournissent une « base réduite », sorte de méta-modèle pouvant représenter n'importe quelle carte de flux, ainsi qu'un ensemble de positions d'intérêt à instrumenter.

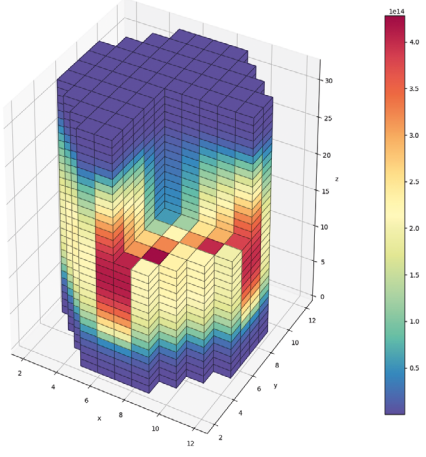
Suite à une recherche bibliographique, deux méthodes de construction de la base réduite et trois algorithmes de positionnement de l'instrumentation ont été sélectionnés.

Une base de données a été générée à l'aide du code de cœur COCAGNE développé par EDF et Framatome en faisant varier le mode de gestion du cœur, le taux d'irradiation du combustible, ainsi que la puissance du réacteur.

Les différents algorithmes ont été implémentés en Python puis appliqués à des problèmes de complexité croissante.

Du fait du bon fonctionnement des méthodes pour des cartes neutroniques 2D, y compris en présence de bruit dans les mesures, un problème 3D plus complexe a été considéré.

Les résultats obtenus sur ce dernier problème, plus mitigés, ont permis de mettre en évidence l'impact des contraintes de placement de l'instrumentation réelle sur l'efficacité des algorithmes employés.



Exemple de flux neutronique 3D dans le cœur de SMR Nuward
© Jérémy Lauret, 2021.

Positioning of SMR incore instrumentation using model order reduction

Keywords: Small Modular Reactors, incore instrumentation, model order reduction, data assimilation

Context

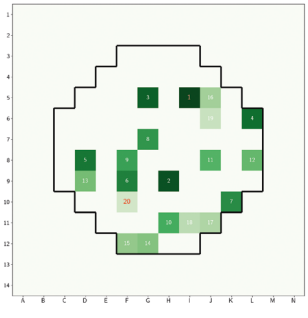
Since 2017, EDF takes part in the conception of the Nuward Small Modular Reactor (SMR), for which an initial design was presented in April 2021. Even though the Nuward SMR is based on the same technology as the reactors currently operated in France, a large number of studies are being carried out in order to increase its compacity, safety, and simplicity of usage.

Missions and goals

We consider here the problem of placing detectors in the core of the Nuward SMR. This problem consists on the one hand of implementing a procedure to reconstruct neutronic flux maps from one-off measures, and on the other hand of optimising the positionning of the instrumentation to ensure a high quality reconstruction. We use data assimilation methods, which are methods designed to associate a numerical model and a set of experimental measures to estimate the state of a system. The numerical model is generated by a model order reduction algorithm, which offers a computationally efficient alternative to neutron simulation codes. The objective of this work is to compare different model order reduction methods in terms of accuracy, but also in terms of robustness against noise in measurements and loss of instrumentation.

Abstract

From a database of flux maps generated by a neutron simulation code, the model order reduction algorithms used in this project provide a "reduced basis", which is a kind of meta-model that can represent any flux map, as well as a set of positions of interest to instrument. Following a bibliographical study, two reduced basis construction methods and three instrumentation positioning algorithms were selected. A database was generated using the COCAGNE core code developed by EDF and Framatome by varying the core management mode, the burnup, and the reactor power level. The different algorithms were implemented in Python and then applied to problems of increasing complexity. Noting the good performance of the methods on 2D neutron maps, including in the presence of measurement noise, a more complex 3D problem was considered. The results obtained on this last problem, which were less convincing, have highlighted the impact that constraints on real-world instrumentation placement may have on the efficiency of the algorithms used here.



Les 20 premières positions instrumentées par l'un des algorithmes © Jérémy Lauret, 2021.

Éléments de bibliographie

ARGAUD, Jean-Philippe, BOURIQUET, Bertrand, GONG, Helin *et al.*, 2017. Stabilization of (G) EIM in presence of measurement noise: application to nuclear reactor physics. *In*: BITTENCOURT, Marco L., DUMONT, Ney A. et HESTHAVEN, Jan S. (eds.). *Spectral and High Order Methods for Partial Differential Equations ICOSAHOM 2016*. S. L. : Springer, Cham, pp. 133-145.

BARRAULT, Maxime, MADAY, Yvon, NGUYEN, Ngoc Cuong, *et al.*, 2004. An "empirical interpolation" method: application to efficient reduced-basis discretization of partial differential equations. *Comptes Rendus Mathematique*, novembre 2004, vol. 339, n° 9, pp. 667-672.

WILLCOX, Karen, 2006. Unsteady flow sensing and estimation via the gappy proper orthogonal decomposition. *Computers & fluids*, mars 2006, vol. 35, n° 2, pp. 208-226.

Régis SANTET

Élève ingénieur concours commun
Master Modélisation, majeure Analyse numérique et Équations aux dérivées partielles, Sorbonne Université

Promotion 2021

Début de doctorat réalisée à :
CERMICS, École des Ponts ParisTech

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Gabriel STOLTZ, chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Julien REYGNER, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

Discrétisation de la dynamique de Langevin pour l'échantillonnage de mesures

Mots-clés : physique statistique numérique, Markov Chain Monte-Carlo, dynamique de Langevin

Contexte

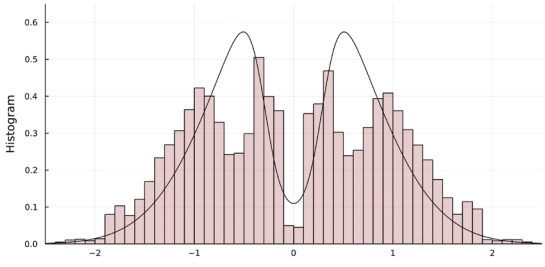
Le projet de fin d'études (PFE) s'inscrit dans le cadre d'une thèse de 3 ans débutée en octobre 2021 au sein du CERMICS et de l'INRIA (équipe Matherials). L'objectif est d'étudier des techniques pour échantillonner plus efficacement les dynamiques venant d'équations différentielles stochastiques. Une des pistes explorée consiste à inclure une diffusion non constante pour accélérer la convergence vers le régime permanent.

Missions et objectifs

Les premiers mois de thèse visent à prendre en main le sujet par la lecture d'articles scientifiques et la reproduction de résultats, les recherches bibliographiques, la création d'un code simple de dynamiques moléculaires et l'implémentation de la technique citée plus haut. Un article scientifique, portant sur le contenu de ce PFE, est actuellement en cours de rédaction.

Résumé

Une revue des principaux algorithmes de Markov Chain Monte-Carlo est présentée : Metropolis-Hastings (MH), Metropolis-Adjusted Langevin Algorithm (MALA) et (Generalized) Hamiltonian Monte Carlo ((G)HMC). Nous nous intéressons, en particulier, à la dynamique de Langevin avec bruit multiplicatif, c'est-à-dire, avec un coefficient de diffusion non constant, qui permet d'accélérer la convergence vers le régime permanent. Afin d'obtenir de meilleurs taux de rejet dans le ratio de Metropolis, nous nous plaçons dans le contexte HMC, dans lequel un Hamiltonien non séparable est introduit (Riemann Manifold HMC). Afin d'échantillonner sans biais la mesure invariante liée à notre dynamique, des méthodes numériques doivent être utilisées. Le flot Hamiltonien numérique, notamment, doit vérifier certaines propriétés (réversibilité en temps, symplecticité), pour un échantillonnage sans biais. Ceci n'est possible qu'avec des méthodes implicites, usuellement implémentées grâce à la méthode de Newton ou du point fixe. Néanmoins, elles peuvent ne pas converger ou bien ne pas vérifier la réversibilité numérique (s'il y a plusieurs solutions), ce qui implique alors l'existence d'un biais dans l'échantillonnage. Afin de pallier ce problème, nous proposons un algorithme qui permet, en pratique, de préserver la réversibilité du flot Hamiltonien numérique. Nous prouvons que le flot Hamiltonien numérique utilisé est symplectique et réversible, même pour des méthodes implicites et donc, que notre algorithme échantillonne sans biais la mesure invariante. Nous analysons l'efficacité de notre algorithme sur un exemple simple unidimensionnel et montrons l'existence d'un biais si la réversibilité numérique n'est pas observée.



Échantillonnage d'une mesure avec l'algorithme HMC classique dans le cas non séparable © Régis Santet, 2022.

Discretizing Langevin dynamics with multiplicative noise for sampling probability measures

Keywords: Markov Chain Monte-Carlo, unbiased sampling, multiplicative noise, Langevin dynamics

Context

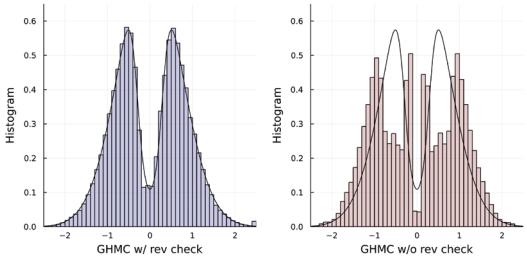
This report was completed as part of a PhD at École des Ponts ParisTech, CERMICS. The aim of the PhD is to study new methods to perform efficient sampling of dynamics coming from stochastic differential equations. One of the approaches is to use a position-dependent diffusion coefficient to speed up the convergence towards steady state equilibrium.

Missions and goals

Provide a scientific literature review and bibliography of the subject. Implement simple molecular dynamics codes as well as the multiplicative noise approach to sample probability measures.

Abstract

In this report, we study the various sampling methods used in the molecular dynamics and computational statistics literature based on Markov Chain Monte Carlo methods. In particular, we are interested in sampling a target probability measure thanks to an overdamped Langevin sampler with a position-dependent diffusion coefficient. In order to do this, we use the Riemann Manifold Hamiltonian Monte Carlo method introduced by Girolami et al., *which is a particular Hybrid/Hamiltonian Monte Carlo method. In order to preserve Hamiltonian features such as time reversibility and symplecticity, implicit methods have to be used since the Hamiltonian of the system is not separable. We show that verifying numerical reversibility is needed to ensure unbiased sampling, and suggest a Generalized Hamiltonian Monte Carlo algorithm (and its one step Hamiltonian Monte Carlo variant) whose numerical flow is modified so that numerical reversibility is always ensured. This is particularly helpful for large integration time steps as implicit methods may not converge. We illustrate the efficiency of our algorithm for a simple one dimensional confining double well potential.*



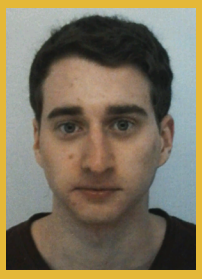
Comparaison de l'échantillonnage d'une mesure avec l'algorithme GHMC suivant si la réversibilité numérique est vérifiée
© Régis Santet, 2022.

Éléments de bibliographie

GIROLAMI, Mark et CALDERHEAD, Ben, 2011. Riemann manifold langevin and hamiltonian monte carlo methods. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, mars 2011, vol. 73, n° 2, pp. 123-214.

HAIRER, Ernst, WANNER, Gerhard et LUBICH, Christian, 2006. Symplectic integration of hamiltonian systems. *In*: HAIER, Ernst, LUBICH, Christian et WANNER, Gerhard (eds.). *Geometric Numerical integration: structure-preserving algorithms for ordinary differential equations*. Berlin, Heidelberg : Springer, pp. 179-236. Series in Computational Mathematics.

LELIÈVRE, Tony, ROUSSET, Mathias et STOLTZ, Gabriel, 2019. Hybrid Monte Carlo methods for sampling probability measures on submanifolds. *Numerische Mathematik*, octobre 2019, vol. 143, n° 2, pp. 379-421.



Léo BATY

Élève ingénieur concours commun
Master parisien de Recherche Opérationnelle (MPRO),
Conservatoire national des Arts et Métiers

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
SNCF Innovation & rechecherche

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Hugo BELHOMME, doctorant, CIFRE

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Axel PARMENTIER, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Replanification ferroviaire en temps réel par résolution hybride IA/RO

Mots-clés : recherche opérationnelle, Graph Neural Networks, temps réel, multi-objectifs, replanification ferroviaire

Contexte

Ce stage s'inscrit dans le contexte industriel du Transilien, service de transport en commun le plus utilisé en Île-de-France. Sur ce réseau, la moindre perturbation peut se propager et s'amplifier en très peu de temps. Interviennent alors les opérateurs en centre de contrôle qui prennent des décisions en temps réel afin de limiter l'impact des perturbations sur les trains et les voyageurs (problème multi-objectifs).

Missions et objectifs

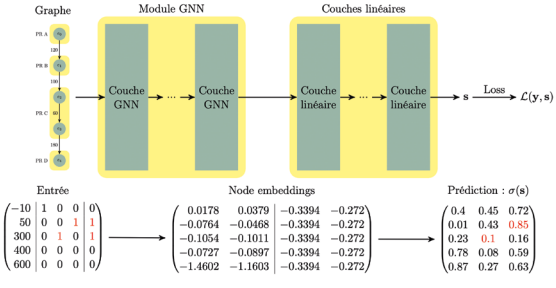
Dans le cadre d'un projet plus large, visant à créer un outil d'aide à la décision pour les opérateurs en centre de contrôle, ce stage portait sur l'utilisation des données d'historique à disposition, afin d'expérimenter des méthodes hybrides entre apprentissage et recherche opérationnelle, en vue de déterminer si cela peut aider à l'amélioration des algorithmes d'optimisation de l'outil.

Résumé

La première phase du stage a consisté à traiter et analyser des données d'historique de plans de transport. J'ai utilisé ces données afin de générer un jeu d'instances labellisées du problème. Cela m'a permis d'obtenir un jeu de données exploitable par des méthodes d'apprentissage supervisé.

Une fois le jeu de données d'apprentissage créé, il a pu être exploité. J'ai construit un modèle de Graph Neural Network (GNN), un type de réseau de neurones qui permet de prendre des graphes en entrée. J'ai donc entraîné un modèle GNN sur le jeu de données créé, en expérimentant diverses architectures afin d'optimiser les performances du modèle sur plusieurs métriques que j'avais préalablement définies. Le modèle final obtenu permet de prédire, pour une instance donnée, les actions de régulation intéressantes, avec une précision moyenne supérieure à 80 %.

Enfin, durant la troisième et dernière phase du stage, j'ai exploité le modèle GNN obtenu en implémentant une heuristique guidée par les prédictions du modèle. Le principe est d'explorer uniquement les scénarii constitués d'actions considérées intéressantes par le GNN, ce qui réduit considérablement l'espace de recherche et donc, le temps d'exécution. Les résultats obtenus sont intéressants : si le temps d'exécution est comparable à l'outil actuel, les résultats sont meilleurs en moyenne. De plus, cette heuristique hybride a l'avantage d'être purement multi-objectifs, car elle n'utilise pas de pondération des objectifs.



Architecture du GNN utilisé et exemple d'application à un petit graphe
© Léo Baty, 2020.

Real time railway replanification using AI/OR hybrid methods

Keywords: operations reserach, Graph Neural Networks, real time, multi-objective

Context

The "Transilien" is the most used transport service in Île-de-France. Its network is very dense, and any perturbation can propagate and be amplified in a short time. In this context, specialist operators in control centers make decisions in real time in order to limit the impact of perturbations on trains and passengers (multi-objective problem).

Missions and goals

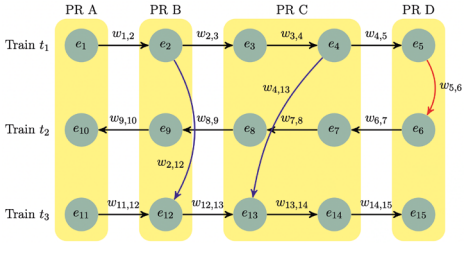
This internship is part of a larger project with the goal of creating a tool for decision support for operators. The goal of the internship was to look at historical train schedule databases and experiment with hybrid methods of Machine Learning and operations research to figure out if these kind of methods can help the tool's optimization algorithms.

Abstract

During the first step of the internship, I analyzed the database and used this data to create labeled instances of the problem. This allowed us to obtain a dataset usable by supervised learning methods.

After that we exploited the dataset: I built a Graph Neural Network (GNN) model, a kind of neural network which can take graphs as inputs. I trained this GNN model with the dataset created previously, experimenting with various architectures to optimize the model performances and several metrics I defined beforehand. The final model is able to predict interesting actions with more than 80% precision.

During the third and final step of the internship, I used the final GNN model by implementing an heuristic guided by its predictions. The idea is to explore only scenarios that include actions considered interesting by the GNN model, which reduces the search space, and thus the execution time, considerably. The obtained results were promising: on average, the execution time is similar to the current optimization tool, but the solutions obtained are better. In addition, this heuristic has the benefit of being completely multi-objective, by using no objective weighting.

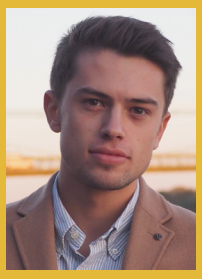


Exemple d'instance du problème, modélisée par un graphe
© Léo Baty, 2020.

Éléments de bibliographie

ALTAZIN, Estelle, 2018. *Stabilité et replanification d'un système ferroviaire dense*. Thèse de doctorat : Génie industriel. Lyon, Saint-Étienne : université de Lyon, École doctorale Sciences Ingénierie Santé.

BENGIO, Yoshua, LODI, Andrea et PROUVOST, Antoine, 2021. Machine learning for combinatorial optimization: a methodological tour d'horizon. *European Journal of Operational Research*, avril 2021, vol. 290, n° 2, pp. 405-421.



Louis BOUVIER

Élève ingénieur concours commun
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2020

Début de doctorat réalisée à :
CERMICS, École des Ponts ParisTech

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Axel PARMENTIER, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Frédéric MEUNIER, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

Problèmes opérationnels et stratégiques d'acheminement de stocks d'emballages

Mots-clés : logistique, problème d'*inventory routing*, descente à voisinage large, programme stochastique, apprentissage automatique pour la recherche opérationnelle

Contexte

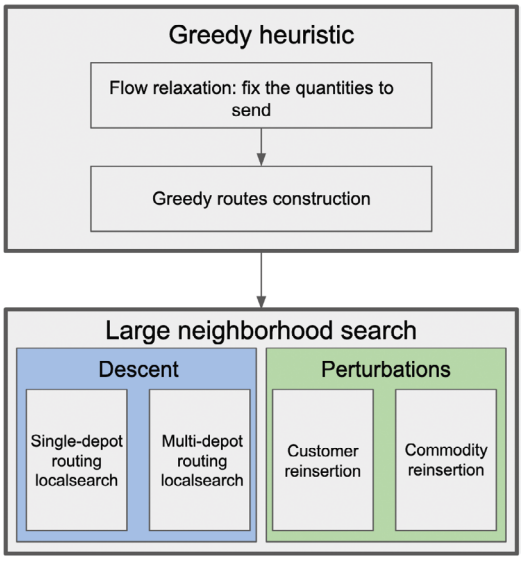
Ce projet de fin d'études correspond aux premiers mois de ma thèse CIFRE entre le laboratoire CERMICS à l'École des Ponts et le Groupe Renault. Le sujet émane d'un besoin concret de l'entreprise. Celle-ci envoie des pièces automobiles de ses fournisseurs vers ses usines dans des emballages de tailles variées. Ces derniers sont réutilisés, ce qui nécessite d'optimiser la logistique retour des emballages vides à grande échelle et peut se formuler comme un problème d'*inventory routing*.

Missions et objectifs

Les missions sont séparées selon deux sous-problèmes : le « *dispatch* ferme » qui correspond au choix des routes et des chargements des camions en emballages vides chaque jour et le « *dispatch* prévisionnel », incluant le choix à long terme de routes à contractualiser. Un état de l'art, une formulation du problème, la production d'un algorithme et d'un code académique étaient prévus dans les deux cas, ainsi que des échanges avec les équipes opérationnelles et IT.

Résumé

Ce projet de fin d'études a été l'occasion d'adapter une méthode de résolution approchée du problème d'*inventory routing* déterministe (descente à voisinage large), développée en stage de recherche dans un contexte simplifié, à celui plus général considéré en thèse. Cette tâche implique la généralisation de voisinages de la littérature, la modification des formulations de programmes linéaires en nombres entiers à la base de deux nouveaux voisinages larges, la réécriture d'une relaxation du problème et l'optimisation du code. Des tests sur des instances réelles Renault montrent que les coûts des solutions sont relativement similaires au cas simplifié, pour une durée de calcul plus importante. Ces résultats encourageants feront l'objet d'une publication. J'ai pu également commencer à modéliser le problème de « *dispatch* prévisionnel » en optimisation stochastique, et suggérer des pistes de résolution. Enfin, je me suis intéressé aux outils de *Machine Learning* pour la recherche opérationnelle et à leur application potentielle sur les problèmes d'*inventory routing* déterministe et stochastique. Au fil de ces travaux, j'ai pu rencontrer les équipes opérationnelles et informatique de Renault, discuter avec le métier des besoins et de ce qui est fait aujourd'hui, entamer un processus d'industrialisation du code de la descente de voisinage large et présenter les idées sous-jacentes lors de réunions internes et externes à Renault.



Solution process: initialization and large neighborhood search
© Louis Bouvier, 2021.

Renault's continent-scale multi-attribute inventory routing problem

Keywords: logistics, inventory routing problem, large neighborhood search, stochastic program, Machine Learning for operations research

Context

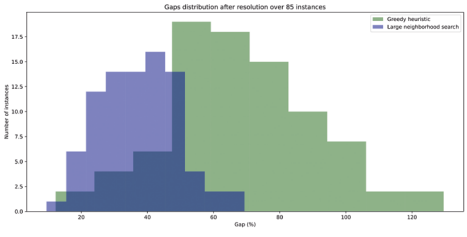
The origin of the problem we consider is the following: Renault sends car parts from suppliers to plants in packaging of different sizes. The latter is made to be reused, which implies the consideration of the return logistics of the empty packaging. This problem has to be solved every day to plan trucks' routes and loading, representing dozens of millions of euros and hundreds of thousands of tons of CO_2 per year.

Missions and goals

The missions are separated into two subproblems: the "firm dispatch", which corresponds to the choice of routes and truck loads of empty packaging on each day, and the "forecast dispatch", including the long-term choice of routes to be contracted. A state of the art, a problem formulation, the production of an algorithm, and an academic code were planned in both cases. The work also entailed exchanges with the operational and IT teams.

Abstract

Based on a preliminary work during my research internship, we adapt a large neighborhood search (LNS) designed in a simplified context (with one-day transportation and a limit on the number of stops on a route) to a more realistic framework. The aim is to address the "firm dispatch" subproblem of the PhD thesis. To do so, we change the structure of the routing descent, generalize split delivery vehicle routing problem (SDVRP) neighborhoods involving inventory considerations, and define a new graph structure to underpin the two large neighborhood mixed-integer linear program (MILP) formulations. The latter constitute the main contribution of the previous LNS. We evaluate the performance of our new LNS based on 31 real instances extracted from Renault's files. Our instances are one order of magnitude larger than the ones addressed in the IRP literature. We highlight that no algorithm is known to properly scale to our context. We emphasize that we manage to reach similar cost gains compared with the simplified context, with a higher computation time. Last, we hint at some perspectives for my PhD: using recent ideas in Machine Learning for operations research to gain computational speed, and considering the stochastic version of the IRP to introduce long-term decisions.



Gaps before (green) and after (blue) the large neighborhood search (no good lower bound is known)
© Louis Bouvier, 2021.

Éléments de bibliographie

COELHO, Leandro C., CORDEAU, Jean-François et LAPORTE, Gilbert. Thirty years of inventory routing. *Transportation Science*, février 2014, vol. 48, n° 1, pp. 1-19.

COELHO, Leandro C., DE MAIO, Annarita et LAGANA, Demetrio, 2020. A variable MIP neighborhood descent for the multi-attribute inventory routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [en ligne], décembre 2020, vol. 144, 102137. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102137.

BENGIO, Yoshua, LODI, Andrea et PROUVOST, Antoine, 2021. Machine learning for combinatorial optimization: a methodological tour d'horizon. *European Journal of Operational Research*, avril 2021, vol. 290, n° 2, pp. 405-421.

Thibault FLESSELLES

Élève ingénieur concours commun
Parcours Optimisation
Master Recherche opérationnelle (RO), École des Ponts ParisTech

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Artelys

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Thomas RIDREMONT, ingénieur optimisation

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Frédéric MEUNIER, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidentiel

Amélioration de la résolution du problème de trajectoire

Mots-clés : énergie, optimisation, problème de trajectoire

Contexte

L'optimisation de trajectoire permet de modéliser et d'optimiser les trajectoires d'évolution du mix électrique à un horizon lointain (ex : 2060). Certaines caractéristiques des technologies énergétiques à dimensionner (CAPEX, durée de vie, *etc.*) sont prises en compte pour optimiser les capacités de chaque technologie. Ce problème, modélisé pour plusieurs années avec plusieurs scénarii, est donc stochastique et très volumineux.

Missions et objectifs

Artelys souhaite explorer de nouvelles méthodes de résolution dans le but d'améliorer ses performances sur ce type de problème.

Ce travail porte donc sur la R&D de telles méthodes, couplées ou non à l'utilisation de solveur, afin de résoudre le problème ci-dessus évoqué. Il était attendu que soient réalisés une revue de la littérature sur les méthodes, l'implémentation et une comparaison des différentes méthodes, et enfin, des tests de performance.

Résumé

Pour réduire leurs émissions de CO_2, les pays doivent planifier l'évolution de leurs systèmes énergétiques.

Pour les aider dans cette tâche complexe, plusieurs entités intergouvernementales, ONGs et acteurs du secteur privé proposent différentes stratégies d'évolution des systèmes. Afin d'évaluer la faisabilité et les effets de ces stratégies, celles-ci sont transposées en un problème d'optimisation appelé « problème de trajectoire ». Il permet de calculer les meilleurs investissements à réaliser afin d'atteindre les objectifs de la stratégie considérée. Cependant, comme les réseaux d'électricité et plus généralement, les réseaux d'énergie, tendent à être de plus en plus connectés, la plupart des études portent sur un ensemble de pays, comme l'Union Européenne. Dans ce contexte, le problème de trajectoire est, la plupart du temps, trop important pour être résolu en un seul bloc. Une façon de contourner cette difficulté consiste à réduire la dimension du modèle. L'objectif de ce projet est de trouver de nouvelles méthodes de réduction de la dimension du problème de trajectoire. À la suite d'une revue de la littérature, une nouvelle méthode a été implémentée et la qualité de ses solutions a été mesurée.

Lignes de transmission © Pok Rie, 2016 (source : Pexels).

Improving the resolution of the expansion problem

Keywords: energy, optimization, expansion problem

Context

The expansion problem is used to model and optimize the evolution of the electricity mix over a long-term horizon by taking into account the characteristics of the energy technologies to be sized (CAPEX, lifetime, etc.) to optimize the capacities for each technology. This problem is therefore modeled for several years with several scenarios, making it stochastic and very large.

Missions and goals

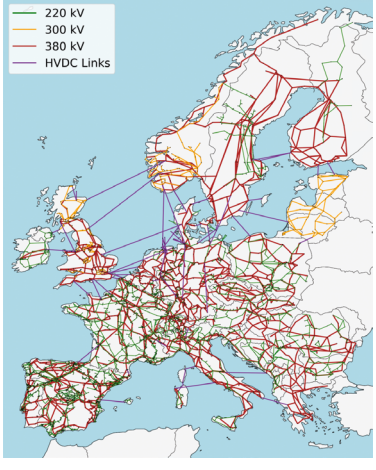
Artelys wishes to explore new solving methods in order to improve its performances on this type of problem.

This project focuses on the R&D of such methods to solve the above problem. The following tasks were expected during this internship :

- *A review of the literature on the methods*
- *An implementation and comparison of the different methods*
- *Some performance tests.*

Abstract

As countries seek to reduce their CO_2 emissions, they face the complex task of planning the evolution of their energy systems. To help them in this task, several intergovernmental entities, NGOs, and private sector actors propose different strategies. In order to evaluate the feasibility and effects of these strategies, they are transposed into an optimization problem called the expansion problem. This problem allows to calculate the best investments to be made in order to reach the objectives of the considered strategy. However, as electricity networks, and more generally energy networks, tend to be more and more connected, most studies focus on a set of countries such as the European Union. In this context, the expansion problem is, most of the time, too big to be solved in one go. One way to get around this problem is to reduce the size of the model. The objective of this project is to find new methods to reduce the dimension of the expansion problem. After a literature review, a new method is implemented and the quality of its solution is measured.



Réseau de transmission européen © Jonas Hörsch, Fabian Hofmann, David Schlachtberger, Tom Brown 2018, CC0 (source : GitHub).

Éléments de bibliographie

ARTELYS, 2022. *Modélisation et optimisation des mix électriques français et européen sur la période 2020-2060. Modélisation des trajectoires. Transition(s) 2050* [en ligne]. Rapport d'analyses. Angers : ADEME, 42 p. Disponible sur : https://librairie.ademe.fr/cadic/6843/modelisation_et_optimisation_des_mix_electriques_2020-2060.pdf (consulté le 12.04.2022).

ARTELYS, 2021. *Estimation de l'impact sur les réseaux électriques entre 2020 et 2050 du scénario AMS de SNBC* [en ligne]. Note de synthèse. Paris : Artelys France, GRDF, 22 p. Disponible sur : https://www.artelys.com/wp-content/uploads/2021/12/Note_synthese_Impact_SNBC_reseaux_electriques.pdf (consulté le 12.04.2022).

Angela ABDRAZAKOVA

Élève ingénieure double diplôme
Université d'État de Novossibirsk (NSU), Russie

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
CANDRIAM

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Julien FABRE, Portfolio Manager

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Aurélien ALFONSI, enseignant-chercheur, CERMICS,
École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Élaboration d'un cadre quantitatif pour le *scorecard* FX interne et l'intégration ESG

Mots-clés : gestion des données, Xlwings, ESG, *scorecard*

Contexte

Ce projet de fin d'études repose sur un stage d'analyste quantitatif, réalisé au sein du département Fixed Income de Candriam, à Paris. Ce projet visait à étudier l'incorporation des facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) dans le processus de prise de décision en matière d'investissement pour une meilleure gestion des risques et des rendements d'investissement durables et à long terme.

Missions et objectifs

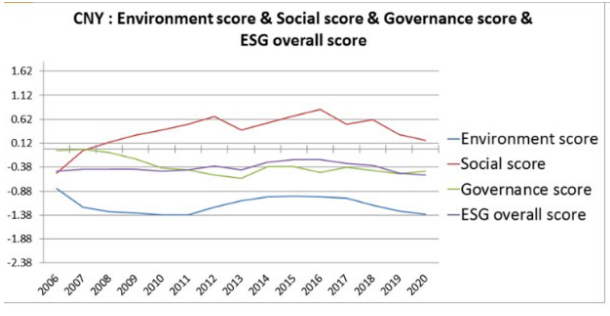
Au cours de ce projet de fin d'études, j'étais chargée de développer le cadre quantitatif permettant d'intégrer les indicateurs ESG dans les tableaux de bord FX et IR internes existants, utilisés par les gestionnaires de portefeuilles des marchés émergents et développés pour la prise de décision et la génération d'idées de transaction.

Résumé

Le souci de l'environnement et du bien-être des employés est une tendance croissante. Les entreprises qui l'ignorent risquent de perdre l'argent des investisseurs et le soutien des consommateurs. La méthode d'intégration ESG implique l'évaluation des risques et des opportunités identifiés par l'analyse des facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) qui sont matériellement significatifs pour l'entreprise ou le pays analysé.

La première partie du travail a consisté en l'amélioration et l'optimisation du cadre existant et la mise en œuvre de la solution en production. Il s'agit d'un outil ergonomique qui permet aux utilisateurs de gérer la base de données (mise à jour, calcul de nouvelles estimations) et de visualiser les scores à partir d'une feuille Excel *via* Xlwings. Cette application est conçue pour des analystes ne travaillant pas avec des scripts Python, afin qu'ils puissent obtenir les résultats par eux-mêmes et rapidement.

La deuxième partie du travail a porté sur la recherche de données ESG et une étude quantitative sur l'intégration des indicateurs ESG a été amorcée.



China's ESG scores © Angela Abdrazakova, 2021.

Building a quantitative framework for in-house FX scorecard and ESG integration

Keywords: data management, Xlwings, ESG, scorecard

Context

This project was written during my final year internship as a quantitative analyst at the Fixed Income Department of Candriam in Paris. The project aimed to study the incorporation of the environmental, social, and governance (ESG) factors into the investment decision-making process for better risk management and sustainable and long-term investment returns.

Missions and goals

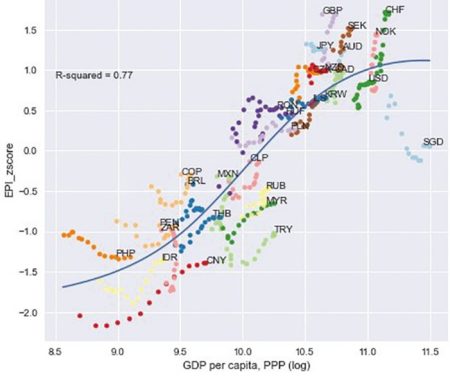
During this final year project, I was responsible for developing further the quantitative framework to integrate ESG indicators into the existing in-house FX scorecard, used both by Emerging Market and Developed Market portfolio managers for decision making and trade ideas generation.

Abstract

Concern for the environment and the well-being of employees is a growing trend. Companies that ignore it risk losing investor money and consumer support. The ESG integration method involves the assessment of risks and opportunities identified through the analysis of environmental, social, and governance (ESG) factors which are materially significant for the analyzed company or country.

The first part of the work resulted in the improvement and optimization of the existing framework and the implementation of the solution in production. The application offers a handy tool that allows users to manage the database (update, calculate new scores) and view scores on an Excel sheet via Xlwings. Many analysts don't work with Python scripts, so essentially this application is designed for them to get the results on their own and quickly.

The second part of the work focused on ESG data, and the first phase of a quantitative study on the integration of ESG indicators was completed.



Relationship between EPI score and Log GDP per capita, PPP © Angela Abdrazakova, 2021.

Éléments de bibliographie

HASTIE, Trevor J. et TIBSHIRANI, Robert J., 1990. *Generalized Additive Models*. New York : Chapman and Hall, 352 p.

WENDLING, Zachary A., EMERSON, John W., DE SHERBININ, Alex *et al.*, 2020. *2020 Environmental Performance Index* [en ligne]. New Haven, Connecticut : Yale Center for Environmental Law & Policy. Disponible sur : epi.yale.edu (consulté le 11.04.2022).

Thibaut BOURDAIS

Élève ingénieur concours commun
Master Probabilités et modèles aléatoires (PMA), Sorbonne Université

Promotion 2020

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Institut Europlace de Finance

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Nadia OUDJANE, chercheuse senior

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Benjamin JOURDAIN, enseignant-chercheur, École des Ponts ParisTech

Application de méthodes de retournement de temps au contrôle stochastique

Mots-clés : contrôle stochastique, simulations Monte-Carlo, retournement du temps

Contexte

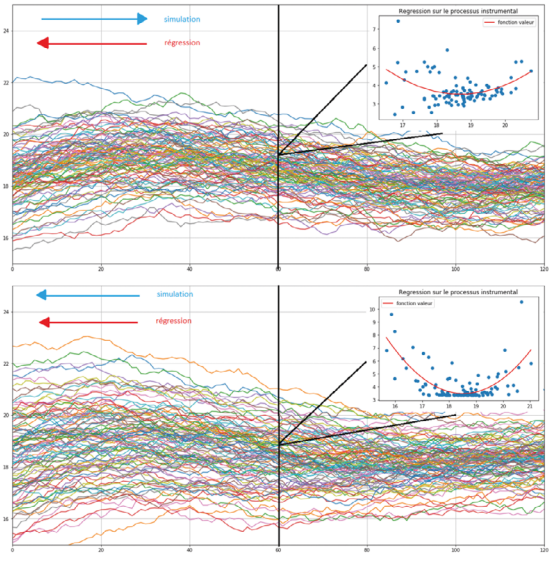
Avec le développement des énergies renouvelables, un des enjeux majeurs de la transition écologique est d'être capable de piloter une partie de la consommation électrique à défaut de pouvoir piloter toutes les sources d'énergies. Il s'agit donc de compenser la variabilité des énergies renouvelables en contrôlant à distance une partie de la consommation (typiquement, les chauffe-eaux, réfrigérateurs, recharges de véhicules électriques, *etc.*). Le problème change de nature, en passant d'un problème d'optimisation sous incertitudes de grande taille à un problème de très grande taille.

Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études a pour objectif l'étude et l'amélioration d'une méthode originale de retournement du temps pour contourner le fléau de la dimension dans des problèmes de contrôle stochastique en très grande dimension, avec des applications dans la gestion de flexibilités diffuses sur un réseau électrique. Il est réalisé en partenariat avec EDF.

Résumé

Résoudre numériquement un problème de contrôle stochastique revient essentiellement à déterminer la fonction valeur sous-jacente, solution de l'équation de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) associée au problème. En grande dimension, les approches employées sont des méthodes de type Monte-Carlo. Une méthode classique consiste à simuler un système de Forward Backward Stochastic Differential Equations (FBSDE) associé à l'équation HJB. Deux problèmes pratiques se posent alors : le choix du processus instrumental pour simuler la grille de résolution, ainsi que des problèmes de mémoire, la résolution nécessitant de simuler et de stocker un grand nombre de trajectoires du processus instrumental avant même l'approximation numérique de la fonction valeur. Lors de ce projet de fin d'études, une méthode originale basée sur le retournement dans le temps du processus instrumental a été étudiée et améliorée. L'idée consiste à générer la grille de résolution de façon rétrograde, au fur et à mesure que la fonction valeur est calculée. Cette technique permet d'exploiter la connaissance de la fonction valeur pour générer de façon adaptative la grille dans les zones pertinentes de l'espace d'états pour le calcul de la fonction valeur, ainsi que de stocker les valeurs du processus instrumental au fur et à mesure de sa simulation.



Comparaison des approches classique (haut) et rétrograde (bas).
© Thibaut Bourdais, 2021.

Time reversal of stochastic processes: an application to stochastic control problems

Keywords: stochastic control, Monte-Carlo methods, time reversal

Context

As more and more renewable energies are included in electricty production, one of the biggest challenges of the energy transition is to control a part of the electrical consumption failing the ability to fully control electricity production. The question is one of compensating for the variability of renewable energies by remotely controlling part of the consumption (typically, water heaters, refrigerators, electric vehicle recharging, etc.*). We then move from a large scale optimization problem under uncertainty to a very large scale problem, and the problem completely changes in nature.*

Missions and goals

The objective of my final year project was to study and improve an original time-reversal method to circumvent the curse of dimensionality in very high dimensional stochastic control problems, with applications in the management of diffuse flexibilities in a power grid (the project was realized in partnership with EDF).

Abstract

Numerically solving a stochastic control problem essentially amounts to determining the underlying value function, which is the solution of the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation associated with the problem. In high dimension, Monte-Carlo type methods are widely used. A classical method consists of simulating a system of Forward Backward Stochastic Differential Equations (FBSDE) associated with the HJB equation. Two practical problems arise: the choice of the instrumental process to simulate the resolution grid, and the issue of memory, as the resolution requires simulating and storing a large number of trajectories of the instrumental process before the numerical approximation of the value function. During my final year project, we studied and improved an original method based on the time reversal of the instrumental process: the idea consists in generating the resolution grid in a retrograde way as the value function is computed. This technique makes it possible to exploit the knowledge of the value function to adaptively generate the grid in the relevant areas of the state space for the computation of the value function, as well as to store the values of the instrumental process as it is being simulated.

Éléments de bibliographie

IZYDORCZYK, Lucas, OUDJANE, Nadia et RUSSO, Francesco, 2021. A fully backward representation of semilinear PDEs applied to the control of thermostatic loads in power systems. *Monte Carlo Methods and Applications*, décembre 2021, vol. 27, n° 4, pp. 347-371.

TOUZI, Nizar, 2013. *Optimal stochastic control, stochastic target problems, and backward SDE*. New York : Springer Science & Business Media, 219 p. Fields Institute Monographs.

Jeffrey MAHOU

Élève ingénieur concours commun
Master Modélisation, analyse, simulation (MAS), Sorbonne Université
et École des Ponts ParisTech

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Yoobic

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Avi HAIAT, CTO

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Vincent LE PETIT, enseignant-chercheur, équipe IMAGINE

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidentiel

Localisation et classification de boîtes de médicaments dans des étalages de pharmacies

Mots-clés : vision, apprentissage automatique, apprentissage profond, localisation, classification

Contexte

Yoobic aide les entreprises dans leur digitalisation.

Le département de R&D, en particulier, construit des algorithmes de reconnaissance d'images.

L'une des applications est la détection de boîtes de médicaments dans des étalages de pharmacies. Un laboratoire pharmaceutique prend des photos des étalages, puis l'algorithme de Yoobic détecte et classe automatiquement les boîtes du fabricant (Doliprane 1000 mg par exemple).

Missions et objectifs

Ma mission consistait à recadrer les boîtes de médicaments de manière automatique.

L'entreprise recevait des images studio (en perspective, avec un fond et des effets de style) et mon algorithme devait découper uniquement la partie frontale de la boîte.

Résumé

À mon arrivée, Yoobic voulait changer d'algorithme de reconnaissance d'images.

L'ancien, certes très performant, ne pouvait pas s'adapter à de nouveaux produits à détecter de manière spontanée. De fait, si le fabricant désirait détecter de nouveaux produits, il fallait alors ré-entrainer tout l'algorithme et ré-annoter manuellement des centaines d'images.

Le nouvel algorithme que Yoobic était en train de mettre en place fonctionne sur la comparaison d'images par paires. Il n'a donc besoin que d'images de référence (images studio) des médicaments, qu'il peut ensuite reconnaître dans les étalages.

Cependant, ces images studio ne sont pas très ressemblantes aux images réelles car elles peuvent apparaître sur un fond coloré, avec des effets de style ou selon différentes perspectives.

Ma mission principale consistait à implémenter un algorithme qui pourrait recadrer ces images studio (extraire la face de devant de la boite de médicaments).

Pour cela, j'ai dû récupérer un algorithme existant qui repère des points d'intérêt dans des images et l'adapter au problème de détection des quatre coins de la face principale de la boîte de médicaments.

Une fois ce travail réalisé, j'ai ensuite effectué plusieurs petites tâches comme l'annotation manuelle de boîtes de médicaments afin d'améliorer l'algorithme.

Enfin, j'ai identifié les erreurs dans le nouvel algorithme de détection et réfléchi à la manière de les corriger en ajoutant des images de référence.

Détection des quatre coins de la boîte de médicament
© Yuka pour kiliweb, 2019, CC-BY-SA-3.0 (source : Openfoodfacts.org).

Locating and classifying boxes of medicinal products in pharmacies

Keywords: computer vision, Machine Learning, Deep Learning, localization, classification

Context

My company, Yoobic, helps companies with their digitalization. In particular, the R&D department builds image recognition algorithms. One example is the detection of drug boxes on pharmacy shelves: a pharmaceutical laboratory will take pictures of the shelves, and Yoobic's algorithm will automatically detect and classify the boxes of the manufacturer (Doliprane 1000 mg for instance).

Missions and goals

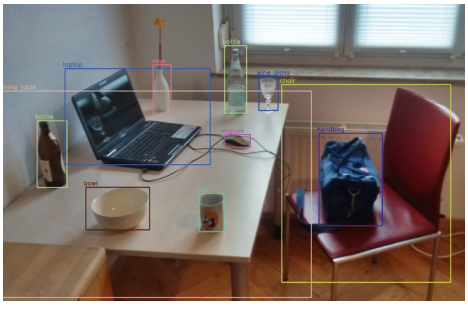
My mission was to automatically crop the medicine boxes. The company received studio images (in perspective, with background and styling effects) and my algorithm had to cut only the front part of the box.

Abstract

When I arrived, Yoobic wanted to change the image recognition algorithm. The old algorithm was very efficient, but could not adapt to new products being detected spontaneously. This meant that if the manufacturer wanted to detect new products, it was necessary to re-train the entire algorithm and, in particular, re-annotate hundreds of images manually. Yoobic was therefore in the process of setting up a new algorithm that worked on pair image comparison. This new algorithm needed only reference images (studio images) of the drugs and could afterward recognize them in the displays.

However, these studio images were not very similar to real images because they could appear before a colorful background, with style effects, in perspective, etc.

My main task was to implement an algorithm that could crop these studio images (extract the front of the medicine box). To do this, I had to retrieve an existing algorithm that could identify points of interest in images and adapt it to our problem, which was the detection of the four front corners of the medicine box. Once this work was done, I had several small tasks like the manual annotation of the boxes to improve the algorithm. My final task was to spot errors in the new detection algorithm and think about how to fix them by adding reference images.



Détection et classification d'objets © MTheiler, 2019, CC-BY-SA-4.0 (source : Wikimedia Commons).

Éléments de bibliographie

ANANTH, Shilpa, 2019. Faster R-CNN for object detection. A technical paper summary. *towardsdatascience.com* [en ligne], août 2019. Disponible sur : https://towardsdatascience.com/ faster-r-cnn-for-object-detection-a-technical-summary-474c5b857b46 (consulté le 11.04.2022).

GANDHI, Rohith, 2018. R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO – Object Detection Algorithms. Understanding object detection algorithms. *towardsdatascience.com* [en ligne], juillet 2018. Disponible sur : https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e (consulté le 11.04.2022).

NELSON, Joseph, 2020. Retail Store Item Detection using YOLOv5. *roboflow* [en ligne], juillet 2020. Disponible sur : https://blog.roboflow.com/retail-store-item-detection-using-yolov5/ (consulté le 11.04.2022).

Chiheb Eddine NAJJAR

Élève ingénieur concours commun
Parcours Modélisation
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Fortia Financial Solutions

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Juyeon KANG, directrice du pôle *Data Science*

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pascal MONASSE, chercheur, LIGM, IMAGINE, enseignant,
École des Ponts ParisTech

Une approche d'apprentissage profond pour l'extraction de tableaux

Mots-clés : vision par ordinateur, détection d'objets, extraction de tableaux, reconnaissance de structure, documents PDF

Contexte

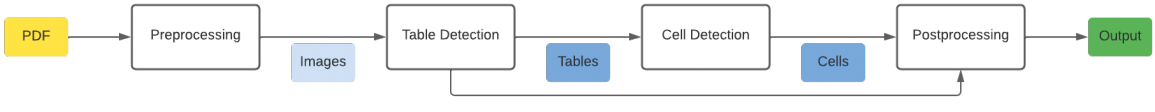
Fortia développe un ensemble d'algorithmes d'apprentissage automatique pour l'analyse de documents financiers. Ils sont conçus pour détecter et extraire des informations clés dans des documents, afin d'aider les entreprises à automatiser leurs processus ou à fournir des analyses basées sur les données. Comme la majorité des données est organisée sous forme de tableaux, l'extraction des tableaux est indispensable.

Missions et objectifs

Fortia continue de développer sa technologie d'extraction de tableaux pour améliorer le processus d'extraction de données et augmenter sa précision et son efficacité. La version actuelle du système d'extraction de tableaux fonctionne bien avec des types spécifiques de documents et des styles de tableaux limités. L'objectif de ce stage est d'améliorer la technologie existante et de créer un système plus générique et robuste qui puisse détecter des tableaux à partir d'une plus grande variété de documents avec une bonne précision.

Résumé

Nous abordons le problème de l'extraction de tableaux qui peut être décomposé en deux sous-tâches : détection de tableaux et reconnaissance de leurs structures. La première nécessite une détection précise des régions tabulaires dans un document. La seconde consiste à reconnaître et à extraire des informations des lignes et des colonnes des tableaux identifiés. Cette tâche est importante pour l'analyse automatique des documents. Dans ce travail, nous introduisons un *pipeline* de bout en bout pour l'extraction des tableaux qui utilise des modèles de détection d'objets rapides et efficaces pour localiser les tableaux et les cellules, et un ensemble d'heuristiques pour identifier la structure du tableau et en extraire son contenu. Nous effectuons plusieurs expériences pour sélectionner les modèles et l'ensemble de données d'entraînement. Nous étudions quelques techniques et heuristiques pour améliorer la qualité de la sortie du *pipeline*. Nous montrons que notre approche se généralise bien par rapport à l'approche interne en analysant ses performances sur un ensemble de données de test avec de nouveaux styles de tableaux jamais vus pendant l'entraînement. Les expériences révèlent que notre *pipeline* est plus efficace en termes de précision de détection et de qualité d'extraction sur le nouvel ensemble de données de test tout en obtenant des résultats comparables sur l'ensemble de données de test interne.



Pipeline d'extraction de tableaux © Chiheb Eddine Najjar, 2022.

A Deep Learning approach to table extraction

Keywords: computer vision, object detection, table extraction, structure recognition, PDF documents

Context

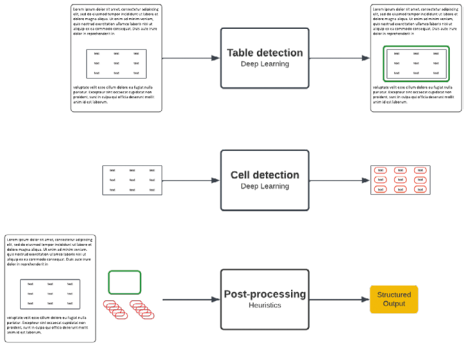
Fortia Financial Solutions is developing a set of Machine Learning algorithms for financial document analysis. The algorithms are designed to detect and extract key information in documents to help companies automate their processes or provide insight into and data-driven analysis of the company's financial decisions. As the majority of the data is organized in tabular format, the extraction of the tables is essential.

Missions and goals

Fortia continues to develop its table extraction technology to further improve the data extraction process and increase its accuracy and efficiency. The current version of the table extraction system works well with specific types of documents and table patterns. The objective of the internship is to improve upon the existing technology to create a system which is more generic and robust, and which allows us to detect tables from a more diverse variety of documents with high accuracy.

Abstract

We tackle the problem of table extraction which can be broken down into two components: table detection and table structure recognition. The first requires accurately detecting tabular regions inside a document. The second involves recognizing and extracting information from the rows and columns of the identified table. This task is crucial for automatic document analysis. In this work, we introduce an end-to-end pipeline for table extraction which uses fast and efficient object detection models to locate tables and cells and a set of heuristics to identify the table's structure and extract its content. We perform several experiments to select the models and the training dataset. We investigate a few techniques and heuristics to further improve the quality of the pipeline's output. We show that our approach generalizes well compared to the in-house approach by analyzing performance on a test set with new table patterns never seen during training. The experiments reveal that our pipeline outperforms the in-house pipeline in terms of detection accuracy and table extraction quality on the new test set while achieving comparable results on the in-house test set.



Fonctionnement du *pipeline* d'extraction de tableaux
© Chiheb Eddine Najjar, 2022.

Éléments de bibliographie

GÖBEL, Max, HASSAN, Tamir, ORO, Ermelinda *et al.*, 2012. A methodology for evaluating algorithms for table understanding in PDF documents. *In*: CONCOLATO, Cyril et SCHMITZ, Patrick (eds.). *Proceedings of the 2012 ACM symposium on Document engineering*. New York : Association for Computing Machinery, pp. 45-48.

REDMON, Joseph, DIVVALA, Santosh, GIRSHICK, Ross *et al.*, 2016. You only look once: Unified, real-time object detection. *In*: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR 2016)*. S. L. : IEEE, pp. 779-788.

ZHENG, Xinyi, BURDICK, Douglas, POPA, Lucian *et al.*, 2021. Global table extractor (gte): A framework for joint table identification and cell structure recognition using visual context. *In*: *Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision*. pp. 697-706.

Charbel-Raphaël SÉGERIE

Élève ingénieur concours commun
Parcours Probabilités et finance

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Kili Technology

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Maxime DUVAL, Senior Software Engineeer

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pascal MONASSE, chercheur, LIGM, IMAGINE, enseignant,
École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - Confidential - 2 ans

Techniques modernes de *Machine Learning* pour l'annotation de données

Mots-clés : techniques d'ingénierie logicielle, *Data centric AI*, moteur de recherche sémantique, multi-modalités

Contexte

Pour que le *Deep Learning* moderne puisse fonctionner, il faut disposer de grandes quantités de données annotées. Même en utilisant des modèles pré-entraînés, le *fine-tuning* d'un modèle nécessite des données d'entraînement spécifiques pour le cas d'utilisation souhaité. Kili est une start-up française qui veut faciliter l'annotation des données pour aider les entreprises à construire des données à partir de données non structurées (images, textes, vidéos, voix, *etc.*).

Missions et objectifs

Pendant mon stage, j'ai travaillé, en tant qu'ingénieur logiciel *fullstack*, sur l'application web de Kili et en tant qu'ingénieur ML, sur l'étude des différentes technologies d'apprentissage automatique pour rendre l'annotation de données plus ergonomique et plus rapide. Mon travail a débouché sur des propositions de nouveaux outils axés sur les modalités de l'image et du texte.

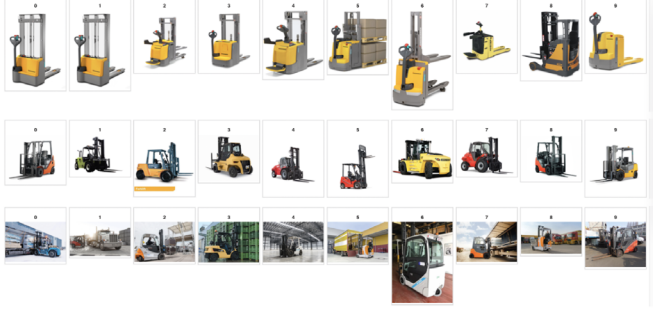
Résumé

La première partie de mon stage a consisté à faire de l'ingénierie logicielle dans le développement web. J'ai participé à l'ensemble de la *stack* : du *front* au *back*, et aux services ML, en passant par les outils de devOps.

Le second objectif de mon stage était d'aider Kili à adapter les techniques modernes *de Machine Learning* pour aider à l'annotation des images.

Pour ce faire, j'ai créé un moteur de recherche sémantique d'images. J'ai, par la suite, utilisé la technologie à la base de la recherche d'images pour créer un moteur de détection d'*outliers*. Enfin, j'ai conçu un algorithme d'assistance à la vérification des annotations, qui permet de les vérifier en visualisant plusieurs images similaires en même temps.

Afin d'aider à l'annotation dans les autres modalités, j'ai créé deux outils : un outil de propagation grammaticale, qui permet de chercher les occurrences de mot ou d'expression en prenant en compte la grammaire ; et un outil d'aide à l'annotation de NER en *zero shot*. J'ai également fait des études de faisabilité sur les autres modalités proposées par Kili (pdf, vidéos, sons).



Une fois les images labellisées, on peut parcourir les images par lot d'images similaires. Ci-dessus, trois lots.

© Charbel-Raphaël Ségerie, 2022, Icônes : images.cv.

Modern Machine Learning techniques for data annotations

Keywords: software engineering techniques, Data centric AI, semantic search engine, multi-modalities

Context

The efficiency of modern Deep Learning techniques relies on large amounts of annotated data. Even using pre-trained models, fine-tuning a model requires specific training data for the desired use case. Kili is a French start-up that aims to facilitate data annotation to help companies build data from unstructured data (images, text, video, voice, etc.*).*

Missions and goals

During my internship, I worked as a fullstack software engineer on the Kili web application but also as an ML engineer to study different machine learning technologies to make data annotation more ergonomic and fast. My work led to proposals of new tools focused on image and text modalities.

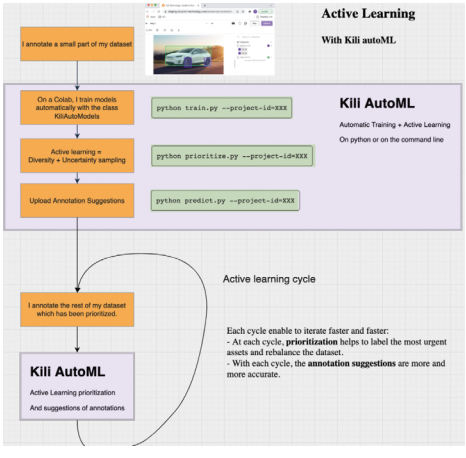
Abstract

The first part of my internship consisted in working as a software engineer for web development. I participated in the whole stack, from the front to the back, to the ML services, through the devOps tools.

The second objective of my internship was to helping Kili to adapt modern Machine Learning techniques to help with annotations.

In order to help annotating images, I created a semantic image search engine. I then used the technology behind image search to create an outlier detection engine. Finally, I designed an algorithm to assist annotation verification, which allows to verify annotations by viewing several similar images at the same time.

In order to assist annotation in other modalities, I built two tools: a grammatical propagation tool, which allows to search for word or expression occurrences taking grammar into account, and a tool to assist annotation of NER in zero shot. I also did feasibility studies on the other modalities proposed by Kili (pdf, videos, sounds).



Active learning, avec la librairie open source Kili autoML, permettant d'itérer rapidement sur un *dataset*.
© Charbel-Raphaël Ségerie, 2022.

Éléments de bibliographie

LIU, Fei T., TING, Kai Ming et ZHOU, Zhi-Hua, 2008. Isolation forest. *In: 2008 eighth IEEE international conference on data mining*. S. L. : IEEE, pp. 413-422.

VAN DER MAATEN, Laurens et HINTON, Geoffrey, 2008. Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research*, vol. 9, n° 11, pp. 2579-2605.

Youval VANLAER

Élève ingénieur concours commun
Parcours Vision et apprentissage
Master recherche Mathématiques, vision, apprentissage (MVA),
École des Ponts ParisTech et ENS Paris-Saclay

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Université de Paris

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Lionel MOISAN, enseignant-chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pascal MONASSE, chercheur, LIGM, IMAGINE, enseignant,
École des Ponts ParisTech

Super-résolution en microscopie à fluorescence

Mots-clés : déconvolution, super-résolution, microscopie, méthodes-variationnelles, problèmes inverses

Contexte

La résolution des microscopes optiques est intrinsèquement limitée par la diffraction. Face aux très gros enjeux d'un système de nanoscopie optique, de nombreuses recherches ont permis, ces dernières décennies, de repousser cette limite, en utilisant des techniques physiques parfois très sophistiquées.

Missions et objectifs

- Faire une revue bibliographique des méthodes de régularisation d'images existantes pour la résolution des problèmes inverses linéaires dans le cas d'un bruit de Poisson ou mixte Poisson/Gaussien ;
- Proposer un ou plusieurs algorithmes de reconstruction d'images super-résolues ;
- Évaluer quantitativement l'efficacité des méthodes proposées en termes de résolution atteinte et de qualité image.

Résumé

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à la résolution du problème inverse de la déconvolution d'une image, bruitée, par un noyau de diffraction sous contrainte de positivité. Cette résolution peut s'appliquer dans le domaine de la microscopie à fluorescence, dans le but de réduire l'effet de la diffraction sur les images. Après avoir rappelé quelques principes en microscopie optique, nous proposons une résolution de ce problème inverse en calculant l'estimateur du Maximum A Posteriori (MAP) *via* des algorithmes de descente de gradient, accélérés (Nesterov) ou non (gradient projeté). Cependant, cette résolution crée de nombreux artéfacts sur l'image, appelé *effet nightsky*, puisqu'il isole les pixels entre eux. Nous proposons alors plusieurs méthodes pour atténuer le *nightsky*. Dans un premier temps, nous rajoutons une contrainte de bande-limitée, pour que l'image obtenue n'ait pas de fréquences trop grandes. Dans un deuxième temps, nous essayons de trouver un critère d'arrêt qui donne un compromis satisfaisant entre les effets de déconvolution et les artéfacts sur l'image. Finalement, nous proposons un nouveau modèle, appelé *mathematical-sectioning*, qui sépare l'image en deux composantes, l'une parcimonieuse et l'autre régulière. Cette séparation force le modèle à ne pas trop dégrader les structures continues et donc, à améliorer la qualité de l'image.

Image super-résolue avec fond diffus obtenue après notre méthode de déconvolution où l'on peut désormais voir les deux cercles séparément © Youval Vanlaer, 2021.

Image super-resolution in fluorescence microscopy

Keywords: deconvolution, super-resolution, variational-methods, inverse-linear-problem

Context

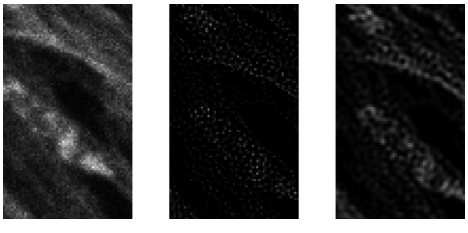
Image resolution in optical microscopy is mainly limited to diffraction. But considering the stakes of an eventual nanoscopic optical system, much research has been done for the last decades in order to reduce this limitation, sometimes through the use of highly sophisticated methods.

Missions and goals

- *Do a literature review of existing image regularization methods to be applied in the solving of the inverse linear problem in case of Poisson or mixed Poisson/Gaussian noise.*
- *Propose one or multiple super-resolute image reconstruction algorithms.*
- *Evaluate, in a quantitative way, the efficiency of the proposed methods in terms of reached resolution and image quality.*

Abstract

In this report, we focus on the resolution of an inverse problem: deconvolution. We try to deconvolve a noisy image, assuming it has been convolved by a diffraction kernel, under positivity constraint. This technique can be applied in the field of fluorescence microscopy in order to reduce the effects of diffraction on acquired images. First, we briefly recall some notions of optical microscopy, and then we propose a resolution based on computing the Maximum A Posteriori (MAP) estimate through gradient descent algorithms, accelerated (Nesterov) or not (projected gradient). However, this resolution causes many artifacts on the image, called the nightsky *effect because of the way it isolates pixels. We then propose several methods to limit this effect. First, we add a band-limited constraint to the image, which prevents the image from having high value pixels surrounded by null ones. Then, we try to find an adequate stopping criterion for the algorithm so that it produces a compromise between the deconvolution effects and artifacts on the image. Finally, we propose a new model called* mathematical-sectioning *which splits the image into a sparse component and a smooth one. This separation encourages the model not to degrade continuous structures and thus to improve the image quality.*



Comparaison des méthodes de déconvolution, d'abord sans contrainte sur le domaine fréquentiel, puis en limitant le domaine fréquentiel © Youval Vanlaer, 2021.

Éléments de bibliographie

ABERGEL, Rémy, 2016. *Quelques modèles mathématiques et algorithmes rapides pour le traitement d'images*. Thèse de doctorat : Mathématiques appliquées. Paris : université Sorbonne Paris Cité.

COMBETTES, Patrick L., DŨNG, Đinh et VŨ, Bàng Công, 2010. Dualization of signal recovery problems. *Set-Valued and Variational Analysis*, décembre 2010, vol. 18, n° 3-4, pp. 373-404.

MACÉ, Anne-Sophie, 2018. *Algorithmes de super-résolution pour la microscopie à balayage laser avec modelage de faisceau par diffraction conique.* Thèse de doctorat : Mathématiques appliquées. Paris : université Sorbonne Paris Cité.

Sciences économiques, gestion, finance

Economics, Management, Finance

Le département Sciences économiques, gestion, finance forme des ingénieurs-managers de haut niveau, capables de mobiliser leurs compétences en sciences de l'ingénieur, économie et finance au service de la création et de la mise en œuvre de projets complexes dans un contexte international et au service des transitions

Enjeux

Les décisions d'investissement se prennent dans un contexte où la digitalisation de l'économie, l'explosion des données disponibles, l'économie des plateformes et l'intégration croissante des économies dans le monde conduisent à repenser les chaînes de valeur, les relations entre producteurs et consommateurs et les frontières entre industrie et services.

En parallèle de ces transformations, la prise en compte de l'environnement et des contextes sociétaux est plus que jamais centrale dans l'évaluation des coûts et des bénéfices d'un projet, dans sa mise en œuvre et dans l'arbitrage entre court et long termes. La dégradation de l'environnement et le changement climatique font apparaître de nouveaux risques, qui doivent être quantifiés et intégrés dans les processus de prise de décision.

En s'appuyant sur un socle scientifique et technique solide l'École perpétue une tradition d'excellence qui remonte à l'ouvrage précurseur de Jules Dupuit (1844) sur la mesure de l'utilité et le financement des travaux publics. Cette tradition se prolonge autour de deux domaines structurants : l'économie industrielle et la régulation des industries de réseau d'une part, l'économie de l'environnement et de l'énergie d'autre part.

L'enseignement du département intègre les développements les plus récents de la recherche académique, fournissant aux élèves une boîte à outils combinant un haut degré de compétences analytiques et quantitatives à une connaissance ouverte sur les débats contemporains et les mutations industrielles en cours.

Formation

Deux parcours sont proposés :

- Ingénieur-économiste : expertise en calcul économique, économie géographique et des territoires, économie du développement durable ;
- Ingénieur-financier : expertise en finance d'entreprise, financement de projets et en particulier financement de la transition écologique.

Les enseignements sont ouverts sur l'actualité économique et financière et sur les métiers de l'ingénieur avec l'intervention de professionnels et *via* la pédagogie par projets.

Le département propose, en dernière année, un programme d'un semestre axé sur la finance durable et verte, intégrant ainsi les besoins des entreprises de s'aligner avec l'accord de Paris sur le climat et les problématiques émergentes, en termes de financement d'activités et d'actifs respectueux de l'environnement.

Les élèves de dernière année peuvent également suivre des formations d'excellence en partenariats avec la Paris School of Economics (PSE), des universités européennes, asiatiques ou anglo-saxonnes comme Columbia University, UC Berkeley ou la Sloan School du MIT.

Métiers

Le département forme des ingénieurs aux métiers du financement de projets dans la banque et le conseil, aux métiers de la gestion des risques dans la banque et l'assurance, mais également aux métiers d'économiste ou économètre au sein d'institutions publiques nationales et internationales, de centres de recherche et d'instituts d'études statistiques, ou encore de directions de la stratégie de grandes entreprises.

À l'occasion des 20 ans de l'installation de l'École à la Cité Descartes
© Patrick Sagnes/École des Ponts ParisTech.

Franck Bancel
Président
Department Head

Pierre Bertrand
Responsable académique
Academic Director

Sandrine Calvary
Inspectrice des études
Academic Advisor

Yushrinah Stiegelmann
Inspectrice des études depuis octobre 2021
Academic Advisor since October 2021

Josiane Niéto
Assistante polyvalente
Department Assistant

The Economics, Management and Finance Department trains high-level graduates who are able to apply their skills and knowledge in engineering sciences, economics and finance to complex projects involving multi-cultural and multi-disciplinary teams to achieve the ecological and digital transitions.

Challenges

Corporate investment decisions are now being made in a context where the digitalization of the economy, the explosion of available data, the economics of platforms and the increasing integration of economies through globalization are leading to a rethinking of traditional value chains and value creation, relations between producers and consumers and the boundaries between industry and services.

Along with these transformations, the design and implementation of projects requires cost benefit analyses that take into account the environment and the social context in which the projects evolve and that can help elucidate short term and long term trade-offs. In particular, environmental degradation and climate change are a source of new risks that need to be quantified and integrated into decision-making processes.

Underpinned by a solid scientific and technical background, the teaching of economics and finance at the School is continuing a tradition of excellence that dates back to the pioneering work of Jules Dupuit (1844) on measuring the utility and financing of public works. This tradition has continued around two structuring domains: industrial economics and network industry regulation on the one hand, and environmental and climate change economics on the other hand

The department's teaching integrates the most recent developments in academic research, providing students with a toolbox that combines high-level analytical and quantitative skills with an acute awareness of current debates and of the industrial transformations taking place.

Curriculum

Two courses are offered:

- *Economist engineer: expertise in economic calculus, geographic and territorial economics, sustainable development economics,*
- *Financial engineering: expertise in corporate and project finance, with a specific attention given to financing the ecological transition*

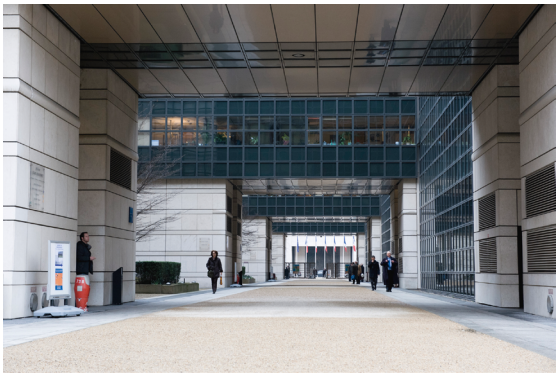
The courses are open to current economic and financial events and to the engineering professions through the involvement of professionals and through project-based teaching.

In the final year, the department offers a green finance option to prepare students to become green finance specialists who can contribute to the development of green finance within banks, international institutions and companies.

For their final year, students may also join excellence programs in partnership with Paris School of Economics (PSE), European universities, Asian and Anglo-Saxon universities, such as Columbia University, UC Berkeley or MIT Sloan School of Business.

Careers

The Department educates engineers for project finance careers either in banking and consultancy, for risk management careers in banking and insurance, but also as economists or econometricians in national and international public institutions, research centers and statistical studies institutes, or in the strategy departments of big companies.



Bâtiment du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.
© Bernard Suard (source : Terra).

Laboratoires et chaires

Laboratories and chairs

Laboratoires • Laboratories

CIRED

Centre international de recherche sur l'environnement et le développement. Thématiques : économie du développement et de l'environnement, questions énergie / déchets / transports / eau / alimentation, enjeux d'environnement global, principe de précaution, modélisation.

International Environment and Development Research Center. Themes: development and environmental economics, energy/waste/transportation/water/food issues, global environmental challenges, precautionary principle, modeling.

PJSE

Paris-Jourdan Sciences économiques. Thématiques : laboratoire de recherche généraliste en économie, avec couverture large de la discipline. Excellence mondialement reconnue plus spécifiquement en économie théorique, en économie publique et en économie du marché du travail.

Paris-Jourdan Economics Laboratory, Paris School of Economics. Themes: general economics research laboratory, with broad coverage of the discipline. A worldwide reputation for excellence, more specifically in theoretical economics, public economics, and labor market economics.

Chaires • Chairs

Développement et financement des projets d'infrastructure durable • *Development and Sustainable Infrastructure Project Finance – Meridiam*

Soutien à la recherche et à l'innovation dans le domaine du développement et du financement de grandes infrastructures et formation de cadres à haut potentiel du secteur public et du secteur privé.

Research and innovation support in the field of development and large-scale infrastructure project finance and education of high potential executives from the state and the private sector.

Les projets de fin d'études
Final year projects

Analyse et calcul économique · *Economic Calculus and Analysis*

TOM BALTEAU | Robustesse et incertitude macroéconomique des stratégies bas-carbone en France
Robustness and macroeconomic uncertainty of low-carbon strategies in France

LOUIS CHARLOT | Différences de genre dans les changements de métier après une période de chômage
Gender differences in job transitions after unemployment

Conseil et Expertise · *Consulting & Auditing*

AYMERIC LAFOND | Stratégie ESG d'un fonds d'investissement immobilier
ESG labeling strategy for a real estate investment fund

KARIM MEZHER | Le digital pour le traitement de l'eau usée : est-ce un outil utile ou un effet de mode ?
Digitalisation in wastewater treatment: a useful tool or just a trend?

Data Science

NICOLAS DE ROUX | Les données alternatives peuvent-elles prévoir la consommation ?
Is alternative data useful to nowcast consumption?

Finance d'entreprise · *Corporate Finance*

OLIVIER DELORME | Cadre analytique pour l'évaluation des entreprises en phase de démarrage
Analytical framework for early-stage companies' evaluation

LOUISE GUITTON | Analyse économique de la performance industrielle – Analyse des coûts de non-qualité
Economic analysis of industrial performance – Analysis of non-quality costs

JULIA PEZÉ | L'impact de la crise du Covid-19 sur l'activité des fusions-acquisitions
Impact of the Covid-19 crisis on M&A activity

Financement de projets · *Project Finance*

VICTOR DERUYVER | Comment financer des projets d'énergie renouvelable aux revenus non sécurisés ?
How to finance renewable energy projects with unsecured revenues

ALICE GREPT | La transition énergétique dans les zones isolées : le *microgrid* une solution privilégiée ?
Energy transition in isolated areas: the microgrid as preferred solution?

ANTOINE NOTHIAS | Les schémas de financement de la résilience, l'outil PPP face au déréglement climatique
Resilience financing schemes and the P3 tool in the face of climate change

Machine Learning

JULES BERTRAND | Prédiction des volumes d'appels arrivant dans un centre de service client
Forecasting incoming call volumes at a customer call center

THOMAS MEUNIER | Détection automatique ou semi-automatique d'entreprises fragilisées par la crise
Automatic or semi-automatic detection of companies weakened by the crisis

EDDY REDON | Couverture optimale du risque de change dans les TRS
Optimal hedging of currency risk

Politiques publiques · *Public Policy*

LORIS ANDRÉ | Financer des chaînes durables pour freiner la déforestation ? L'Amazonie brésilienne
Financing sustainable chains to curb deforestation? The Brazilian Amazon

OUSSAMA BAHIAOUI | Mise en œuvre de la taxonomie européenne dans une grande entreprise : le cas de Veolia
Implementation of the European Taxonomy at a large company: the case of Veolia

MAXIME BARTHE | Intégration des enjeux climatiques dans les programmes d'achats d'actifs de l'Eurosystème
Incorporating climate change in the Eurosystem's asset purchase programmes

CÔME CHERITEL | Analyse de l'impact de la facturation électronique pour l'administration fiscale
Analysis of the impact of electronic invoicing for tax authorities

JEAN-CHRISTOPHE SCHMITT | Promouvoir l'intégration de l'énergie renouvelable au système électrique
Promoting a system-friendly integration of renewable power

Tom BALTEAU

Élève ingénieur ENS Paris-Saclay
Parcours Expertise économique
Master économie de l'environnement, de l'énergie et des transports (EEET), École des Ponts ParisTech, université Paris-Saclay et université Paris Nanterre
Promotion 2021
Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
CIRED
Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Julien LEFÈVRE, chercheur et chargé d'enseignement
Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pierre BERTRAND, responsable académique, département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

Robustesse et incertitude macroéconomique des stratégies bas-carbone en France

Mots-clés : robustesse, incertitude, stratégie bas-carbone, modélisation, impact macroéconomique

Contexte

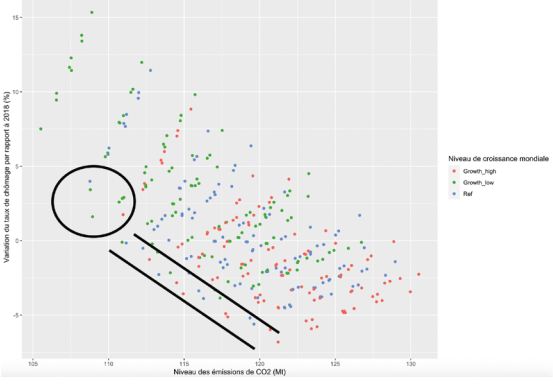
La Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) est la feuille de route de la France pour lutter contre le dérèglement climatique. Elle vise la neutralité carbone à horizon 2050. Diverses stratégies peuvent être envisagées pour l'atteindre. Elles s'accompagnent d'incertitudes et d'impacts macroéconomiques et sociaux qu'il est crucial de comprendre pour construire des stratégies robustes, au service d'une transition socialement désirable et acceptable.

Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études (PFE) explore la problématique émergente de l'analyse d'incertitude des stratégies bas-carbone dans le cas de la France. Le modèle IMACLIM-France est utilisé pour simuler les impacts, à la fois, macroéconomiques, et sur les émissions de CO_2 de stratégies technico-économiques bas-carbone représentatives (inspirées des archétypes de scénarii de transition de l'ADEME) à horizon 2030 et 2050 sous différentes hypothèses incertaines.

Résumé

Sur la base de données fournies par l'Agence de la transition écologique (ADEME), un scénario bas-carbone représentatif a été modélisé à l'aide du modèle d'équilibre général multisectoriel IMACLIM-France. Un ensemble de sous-scénarii a pu être issu de ce scénario représentatif, en faisant varier des paramètres incertains associés : gains de productivité du travail, prix des énergies fossiles, niveau de croissance mondiale, niveau de croissance de la population, élasticité-prix du commerce international ou élasticité de la courbe de revenus. En sélectionnant des variables d'intérêt permettant d'évaluer des objectifs de politiques publiques (niveau des émissions de CO_2, taux de chômage, niveau de PIB, *etc.*), nous avons identifié les jeux de paramètres incertains les plus favorables vis-à-vis de ces variables – permettant d'atteindre un objectif de neutralité carbone tout en conservant un niveau de chômage faible, par exemple. Ce travail s'inscrit dans un projet de recherche qui s'étend jusque mi-2022 et dont l'objet est de reproduire ce processus pour divers scénarii bas-carbone représentatifs : vis-à-vis de stratégies orientées « technologie » ou « sobriété » notamment.



Représentation en 2050 pour 324 sous-scénarii bas-carbone du couple niveaux d'émissions de CO_2 et variation du taux de chômage par rapport à 2018 selon le paramètre « niveau de croissance mondiale du PIB »
© Tom Balteau, 2021.

Robustness and macroeconomic uncertainty of low-carbon strategies in France

Keywords: robustness, uncertainty, low-carbon strategy, modelling, macroeconomic impact

Context

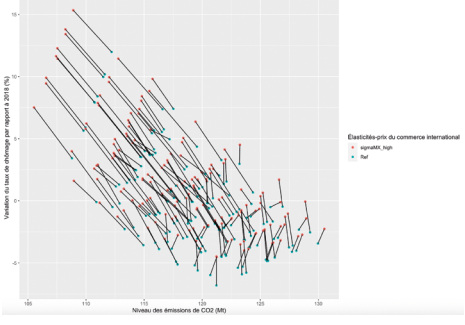
The National Low-Carbon Strategy (SNBC) is France's roadmap to combat climate change. Carbon neutrality by 2050 is the target, with various strategies envisaged to achieve it. These strategies are accompanied by uncertainties and macroeconomic and social impacts that are crucial to understand in order to build robust strategies for a socially desirable and acceptable transition.

Missions and goals

This final year project explores the emerging issue of the uncertainty analysis of low-carbon strategies in the case of France. The IMACLIM-France model is used to simulate the macroeconomic and CO_2 impacts of representative low-carbon strategies (inspired by ADEME's archetypal transition scenarios) for the 2030 and 2050 horizons under different uncertain assumptions.

Abstract

Using data provided by the French Agency for Ecological Transition (ADEME), a representative low-carbon scenario was modeled using the computable general equilibrium (CGE) model IMACLIM-France. A set of sub-scenarios could be derived from this representative scenario by varying associated uncertain parameters: labor productivity gains, fossil fuel prices, world growth level, population growth level, international trade elasticities or wage curve elasticities. By selecting variables of interest to evaluate public policy objectives (level of CO_2 emissions, unemployment rate, level of GDP, etc.), we have identified the most favorable sets of uncertain parameters with respect to these variables – for instance, achieving a carbon neutrality objective while keeping the level of unemployment low. This work is part of a research project that extends until mid-2022 and whose objective is to reproduce this process for various representative low-carbon scenarios, in particular with respect to "technology" or "sobriety" oriented strategies.



Représentation en 2050 pour 324 sous-scénarii bas-carbone du couple niveaux d'émissions de CO_2 et variation du taux de chômage par rapport à 2018 selon le paramètre « élasticités-prix du commerce international »
© Tom Balteau, 2021.

Éléments de bibliographie

GILLINGHAM, Kenneth, NORDHAUS, William D., ANTHOFF, David *et al.*, 2015. Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change: A Multimodel Comparison. *Cowles Foundation discussion paper*, septembre 2015, n° 2022.

GUIVARCH, Céline, ROZENBERG, Julie et SCHWEIZER, Vanessa, 2016. The diversity of socio-economic pathways and CO_2 emissions scenarios: Insights from the investigation of a scenarios database. *Environmental Modelling & Software*, juin 2016, vol. 80, pp. 336-353.

LE TREUT, Gaëlle, LEFEVRE, Julien, LALLANA, Francisco *et al.*, 2021. The multi-level economic impacts of deep decarbonization strategies for the energy system. *Energy Policy*, septembre 2021, vol. 156, 112423.

Louis CHARLOT

Élève ingénieur concours commun, parcours Expertise économique
Master Analyse et politique économique (APE), École des Ponts ParisTech, EHESS, ENS-PSL, Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Paris School of Economics - J-PAL Europe

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Luc BEHAGHEL, professeur, PSE, directeur de recherche, INRAE

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pierre BERTRAND, directeur académique, département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

Différences de genre dans les changements de métier après une période de chômage

Mots-clés : économétrie, *Machine Learning*, expérience de *mailing*, inégalités de genre, chômage

Contexte

Ce projet de fin d'études (PFE) a été effectué à l'École d'Économie de Paris (PSE), dans le bureau du J-PAL (Abdul Latif Jameel Poverty Action Lab), en étroite collaboration avec Pôle Emploi. Les missions qui m'ont été confiées ont concerné différents projets, tous liés au chômage. Dans mon mémoire, j'ai décidé de me concentrer sur l'analyse des différences de genre dans les transitions professionnelles.

Missions et objectifs

L'objectif de ce PFE est de fournir une nouvelle perspective à l'analyse existante des différences homme-femme dans les transitions professionnelles, du chômage vers l'emploi, en France.

Résumé

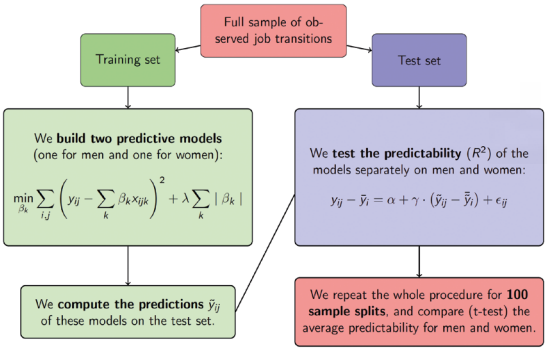
Nous nous intéressons d'abord aux différences homme-femme dans la prévisibilité des transitions professionnelles à partir des caractéristiques des emplois.

Nous montrons que les transitions professionnelles sont plus prévisibles pour les femmes que pour les hommes. Cette plus grande prévisibilité s'explique par le fait que les femmes sont plus concentrées dans les emplois de départ pour lesquels les transitions sont elles-mêmes plus prévisibles. L'étude nous permet de montrer que pour les mêmes emplois de départ, il n'y a pas une plus grande prévisibilité des transitions des femmes par rapport aux hommes.

Nous étudions ensuite les différences homme-femme dans l'impact de l'expérience de *mailing* La Bonne Boîte (LBB), qui consiste en un envoi de recommandations de métiers, indifférenciées selon le genre, aux hommes et aux femmes au chômage.

Les femmes sont plus réactives que les hommes à ce *mailing*, que l'on contrôle ou pas la distribution inégale des emplois d'origine selon le genre.

En outre, les femmes sont significativement plus sensibles à la distance occupationnelle des recommandations de métiers lorsque nous ne contrôlons pas l'emploi d'origine. En revanche, la significativité de ce résultat disparaît lorsque nous instaurons ces contrôles.



Schematic representation of the computation of job transitions predictability © Louis Charlot, 2022.

Gender differences in job transitions after unemployment

Keywords: econometrics, Machine Learning, mailing experiment, gender inequalities, unemployment

Context

This end-of-studies project took place at the Paris School of Economics (PSE), in the J-PAL (Abdul Latif Jameel Poverty Action Lab) office, in close collaboration with Pôle Emploi, the French employment agency. The missions I was given concerned different projects, all related to unemployment. In my Master thesis, I decided to focus on the analysis of gender differences in job transitions.

Missions and goals

The aim of this Master thesis is to provide a new perspective on the existing analysis of gender differences in job transitions, with a focus on transitions from unemployment to employment, in France.

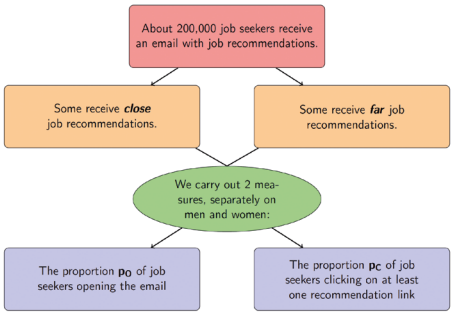
Abstract

We first focus on gender differences in the predictability of job transitions based on job characteristics. We show that job transitions are more predictable for women than men, but that the higher predictability of women's job transitions is due to the fact that women are originally more concentrated in jobs for which transitions are more predictable, and not to a bigger predictability of women's transitions compared to men in the same jobs.

We then study the gender differences in the impact of the La Bonne Boîte (LBB) mailing experiment that provides gender undifferentiated job recommendations to unemployed men and women.

Women are more reactive than men to the mailing, whether we control for the gender unequal origin job distribution or not.

In addition, women are significantly more sensitive to the job recommendation's occupational distance when we do not control for the original job, but the significance of this result disappears when we control for the original job.



Schematic representation of the mailing experiment
© Louis Charlot, 2022.

Éléments de bibliographie

GOLDSMITH-PINKHAM, Paul, HULL, Peter et KOLESÁR, Michal, 2021. On Estimating Multiple Treatment Effects with Regression. *arXiv preprint* [en ligne]. arXiv:2106.05024.

ILLING, Hannah, SCHMIEDER, Johannes F. et TRENKLE, Simon, 2021. *The gender gap in earnings losses after job displacement* [en ligne]. Cambridge : National Bureau of Economic Research, 53 p. Working paper n° 29251. DOI: 10.3386/w29251.

LE BARBANCHON, Thomas, RATHELOT, Roland et ROULET, Alexandra, 2021. Gender differences in job search: Trading off commute against wage. *The Quarterly Journal of Economics*, février 2021, vol. 136, n° 1, pp. 381-426.

Aymeric LAFOND

Élève ingénieur concours commun
Parcours Expertise économique, École des Ponts ParisTech

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Euryale Asset Management

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Marion COUSIN, directrice juridique et conformité

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Franck BANCEL, président du département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts Paristech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Stratégie ESG d'un fonds d'investissement immobilier

Mots-clés : immobilier, santé, stratégie, ESG, extra-financier

Contexte

Les critères extra-financiers, ou critères ESG (environnementaux, sociaux et de gouvernance), sont de plus en plus pris en compte dans les décisions d'investissement et de gestion des actifs financiers. Le secteur de l'immobilier en est un exemple, avec la création de labels et de réglementations nationales et internationales.

Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études (PFE) consiste à élaborer et mettre en œuvre une stratégie visant à prendre en compte les critères ESG dans les activités d'un fonds d'investissement (immobilier de santé). Accompagné par un cabinet de conseil, j'ai travaillé sur cette stratégie, ainsi que sur l'optimisation de ses bénéfices financiers et extra-financiers.

Résumé

Le pilier de ce travail a été la construction d'une grille permettant d'évaluer annuellement les actifs du fonds, sur la base de 24 critères de notation extra-financiers. Pour cela, il a été nécessaire de sélectionner une notation ESG adaptée à l'immobilier de santé (où le volet social S est prépondérant sur le volet environnemental E). Cette grille a été le socle pour d'autres missions : la politique d'engagement ESG (assurant l'intégration des parties prenantes dans la démarche ESG), le *reporting* (rendant compte des résultats aux investisseurs) et la stratégie de rénovation des actifs (dans une optique d'amélioration des résultats ESG). Sur chaque sujet ESG, j'ai réfléchi à l'optimisation des coûts et des bénéfices financiers, tout en prenant en compte les implications extra-financières.

J'ai déduit de ce travail, qu'avec une stratégie adaptée (qui prend en compte les spécificités sectorielles et géographiques des actifs), les démarches ESG peuvent avoir un intérêt, tant du point de vue du fonds que de la société en général. Cette mission a également montré une interdépendance complexe entre le financier et l'extra-financier, ce qui pose des questions morales : il semble difficile d'agréger raisonnablement tous les sujets ESG dans une notation unique. Différentes raisons peuvent être évoquées : la primauté de certains sujets (par exemple, la défense de la vie humaine prime sur le confort humain et les enjeux climatiques), l'absence de consensus sur certains sujets (changement climatique, sujets sociaux, *etc.*), ou encore la difficulté morale à exiger certaines données (données personnelles des bâtiments).

Photographie d'un établissement hospitalier © Tom Fisk, 2019 (source : Pexels).

Analyse et calcul économique
Economic Calculus and Analysis

Conseil et Expertise
Consulting & Auditing

Data Science

Finance d'entreprise
Corporate Finance

Financement de projets
Project Finance

Machine Learning

Marchés financiers
Financial Markets

Politiques publiques
Public Policy

Thématiques transversales
Cross-cutting themes

ESG labeling strategy for a real estate investment fund

Keywords: real estate, health, strategy, ESG, extra-financial

Context

Extra-financial criteria, or ESG (environmental, social, and governance) criteria, are increasingly taken into account in investment decisions and financial asset management. The real estate sector is an example, with the creation of labels and national and international regulations.

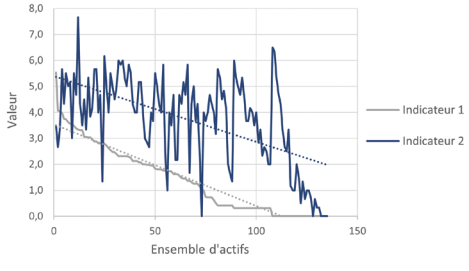
Missions and goals

The missions of this final year project consisted of the elaboration, as well as the implementation, of a strategy taking into account ESG criteria in the activities of an investment fund (healthcare real estate). Accompanied by a consulting firm, I worked on this strategy and on the optimization of its financial and extra-financial benefits.

Abstract

The cornerstone of this work was the construction of a grid for the annual evaluation of the fund's assets, based on 24 non-financial rating criteria. It was necessary to select an ESG rating adapted to healthcare real estate (where the social component S is more important than the environmental component E). This grid was the basis for other missions: the ESG engagement policy (ensuring the integration of stakeholders in the ESG approach), reporting (reporting results to investors), and the asset renovation strategy (with a view to improving ESG results). On each ESG topic, I thought about optimizing financial costs and benefits while taking into account the extra-financial implications.

I have deduced from this work that with an adapted strategy (which takes into account the sector and geographical specificities of the assets), ESG approaches can have an interest, both from the point of view of the fund and of society in general. This mission has also shown a complex interdependence between financial stakes and extra-financial stakes, which raises moral questions: it seems difficult to reasonably aggregate all ESG topics in a single rating. Various reasons can be given: the primacy of certain subjects over others (for example, the defense of human life takes precedence over human comfort and climate issues), the lack of consensus on certain subjects (climate change, social issues, etc.), or the moral difficulty of requiring certain data (private data of buildings).



Visualisation des indicateurs extra-financiers sur les actifs
© Aymeric Lafond, 2022.

Éléments de bibliographie

FILIPIAK, Beata Z. et KIESTRZYN, Marcin, 2021. Potential ESG Risks in Entities of the Healthcare System. *In*: ZIOLO, Magdalena (ed.). *Adapting and Mitigating Environmental, Social, and Governance Risk in Business*. Hershey : IGI Global. pp. 74-102.

GIESE, Guido, NAGY, Zoltán et LEE, Linda-Eling, 2021. Deconstructing esg ratings performance: Risk and return for e, s, and g by time horizon, sector, and weighting. *The Journal of Portfolio Management*, février 2021, vol. 47, n° 3, pp. 94-111.

Karim MEZHER

Élève ingénieur concours commun
Parcours Sustainable and Green Finance

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Suez Smart Solutions

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Thierry MALDONADO, responsable équipe édition, Aquadvanced Plant

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pierre BERTRAND, responsable académique, département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

Le digital pour le traitement de l'eau usée : est-ce un outil utile ou un effet de mode ?

Mots-clés : optimisation, traitement de l'eau, digitalisation, instrumentation, gestion de projet

Contexte

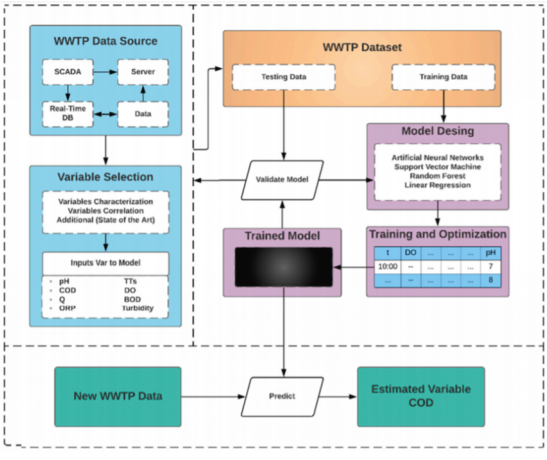
Ce projet de fin d'études (PFE) s'intègre dans le cadre de la digitalisation des processus de traitement de l'eau et notamment de l'eau usée. Il s'agit d'exploiter la donnée (*via* une meilleure utilisation ou du *Machine Learning*) et déployer de l'instrumentation dans le but d'améliorer la performance opérationnelle, économique et environnementale des stations de traitement de l'eau.

Missions et objectifs

Pour un bon déploiement d'un outil de transformation digitale, il faut, à la fois, une bonne maîtrise technique des processus, mais également, une bonne gestion des interfaces entre les exploitants et les concepteurs (ingénieurs et développeurs notamment). L'objectif de ce projet de fin d'études est d'assurer ce lien et, plus concrètement, d'assurer la gestion du projet de déploiement tout en réfléchissant à la conception et à l'utilité du produit proposé.

Résumé

Du fait de la croissance exponentielle du secteur industriel et de la quantité d'eaux usées générée, les systèmes de traitement de ces eaux doivent être optimaux pour minimiser leur impact environnemental et ainsi se conformer aux nouveaux standards et exigences réglementaires en la matière – exigences qui deviennent de plus en plus contraignantes. Il est donc nécessaire d'innover dans la conception et l'utilisation des systèmes de gestion et de contrôle intelligents déjà déployés dans les usines, et d'en changer l'exploitation. La meilleure compréhension des processus biochimiques permet le déploiement d'une instrumentation adaptée pour mesurer des paramètres jusqu'à présent ignorés, bien qu'essentiels dans la performance du procédé de traitement de l'eau (cas du contrôle de l'aération biologique et du niveau d'oxygène dissous dans les bassins d'aération). Une autre approche de valorisation de la donnée passe par des modèles de *Machine Learning* dans le but de comprendre le fonctionnement intrinsèque d'un processus et de prédire son comportement futur, afin d'anticiper les besoins et être mieux préparés aux aléas (cas du contrôle d'injection des réactifs dans les décanteurs).



Logique de modélisation des variables de contrôle © Luis Arismendy, Carlos Cárdenas, Diego Gómes *et al.*, 2020, CC-BY-SA 4.0 (source : MDPI).

Digitalisation in wastewater treatment: a useful tool or just a trend?

Keywords: optimisation, wastewater treatment, digitalisation, instrumentation, project management

Context

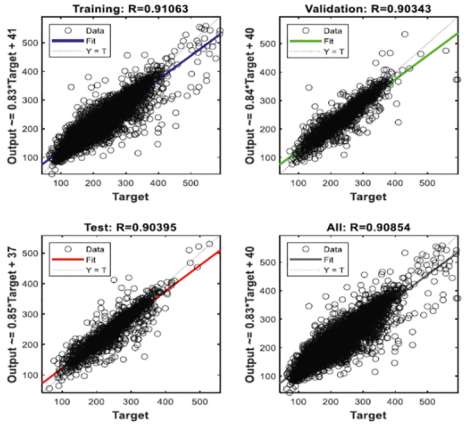
This final year project focuses on the impact of instrumentation and digitalisation on the water treatment process and specifically on wastewater treatment. The goal is to use data (either through a more targeted process-specific usage or Machine Learning) and to deploy instrumentation in order to strengthen the operational, financial, and environmental performances of wastewater treatment plants.

Missions and goals

For a successful deployment of a digital transformation tool, both a good technical knowledge of the processes involved and a good management of interfaces between operational teams and designing teams are needed. The goal of this final year project is to achieve such a deployment, specifically through project management but also taking into consideration the product's functionalities, utility, and design.

Abstract

Given the exponential growth of the industrial sector today and the wastewater produced by its processes, the need for an optimal treatment system for such effluent waters has become more important than ever – especially considering the ever stricter environmental constraints and regulations by national and international agencies. This leads to the need for further innovation in the design and usage of current management and control systems deployed in water treatment plants, and their more intelligent usage. A better understanding of the biochemical processes involved in water treatment allows for the deployment of a new instrumentation to measure parameters so far ignored, yet fundamental to assessing the efficiency of the treatment process (e.g., biological aeration and dissolved oxygen concentration control in aeration settlers). A different approach uses new Machine Learning techniques to understand the intrinsic functioning mechanism of a process and predict its future state so as to anticipate future needs and increase preparedness for random occurrences (e.g., reagents' injection within settlers).



Entrainement, test et validation de la prédiction de la turbidité en entrée de station © Karim Mezher, 2021.

Éléments de bibliographie

ARISMENDY, Luis, CÁRDENAS, Carlos, GÓMEZ, Diego *et al.*, 2020. Intelligent system for the predictive analysis of an industrial wastewater treatment process. *Sustainability*, août 2020, vol. 12, n° 16, 6348.

Nicolas de ROUX

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière
Master Mathématiques de la finance et des données (MFD),
École des Ponts ParisTech, UPEM et INRIA

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
QuantCube Technology

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Oussama BELMEJDOUB, Lead Data Scientist

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Romuald ELIE, enseignant, université Gustave Eiffel

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 10 ans - Confidential

Les données alternatives peuvent-elles prévoir la consommation ?

Mots-clés : apprentissage automatique, macroéconomie, *nowcast*, données alternatives, dépenses de consommation

Contexte

En raison de la nature de ces agrégats, la plupart des grandeurs économiques ne sont disponibles qu'avec un retard, qui atteint parfois plusieurs mois. La connaissance de ces grandeurs étant parfois centrale dans la prise de décision, la mise en place d'indicateurs dits de *nowcast* (prévision du présent) permettant d'en avoir une estimation en temps réel prend une grande importance pour les acteurs économiques et financiers.

Missions et objectifs

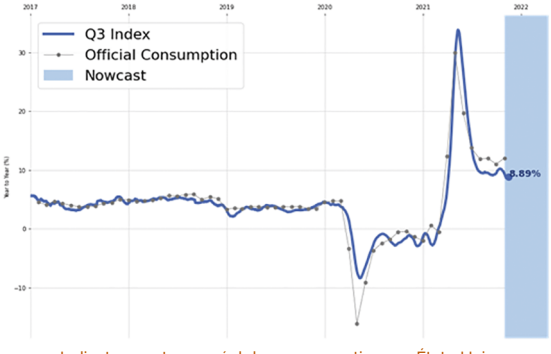
Ce projet de fin d'études (PFE) s'intéresse au cas de la consommation des ménages aux États-Unis, une composante essentielle du produit intérieur brut. Après avoir identifié les principaux secteurs de la consommation américaine et les données pertinentes, les objectifs de ce projet de fin d'études étaient de construire des indicateurs sectoriels robustes, de les agréger en un indicateur global de la consommation et d'évaluer leur pertinence.

Résumé

De nombreuses études ont démontré la pertinence de l'utilisation de données alternatives issues du *Big Data*, en particulier, celles issues de recherches Internet, pour différentes prédictions à court-terme. Leur méthodologie a été appliquée pour réaliser un *nowcast* de la consommation des ménages aux États-Unis.

Ce rapport montre la pertinence d'une approche fondée sur l'analyse sectorielle de la consommation américaine. Dans ce cadre, on effectue une prédiction secteur par secteur reposant sur des méthodes de régression régularisées de type Elastic Net. Elle est ensuite étendue en ajoutant des contraintes sur les coefficients afin de créer des indicateurs robustes. En associant ces méthodes à une pré-selection des données, en particulier, des données issues de recherches Internet, on obtient une série d'indicateurs, dont les performances sont ensuite analysées.

Ces performances positives mettent en évidence la possibilité d'obtenir par cette méthode un indicateur quotidien suivant avec pertinence l'indicateur de consommation des ménages aux États-Unis, y compris pendant la crise sanitaire et économique de 2020.



Indicateur en temps réel de consommation aux États-Unis
© Nicolas de Roux, 2021.

Is alternative data useful to nowcast consumption?

Keywords: Machine Learning, macroeconomics, nowcast, alternative data, US personal consumption expenditures

Context

Due to the nature of the relevant aggregates, most economic variables are only available with a delay, which sometimes reaches several months. Since knowledge of these variables can be central in decision making, the implementation of nowcast indicators providing a real-time estimate is of great importance to many economic and financial players.

Missions and goals

This work focuses on the case of household consumption in the United States, an essential component of the Gross Domestic Product. After identifying the main sectors of US consumption and the relevant data, the objectives of this final year project were to construct robust sectoral indicators, to aggregate them into an overall consumption indicator, and to evaluate their relevance.

Abstract

Many studies have demonstrated the relevance of alternative data, in particular from internet searches, for various short-term predictions. We apply their methodology to create a nowcast of household consumption in the United States.

This report shows the relevance of an approach based on a sectorial analysis of US consumption. In this framework, we perform a sector-by-sector prediction based on regularized regression methods, more precisely on Elastic Net models, which we extend by adding constraints on the coefficients to create more robust indicators. By combining these methods with a pre-selection of our data, in particular data from internet searches, we obtain a series of indicators whose performances are then analyzed.

These positive performances highlight the possibility of using this method to obtain a daily indicator that follows household consumption expenditures in the United States, including during the health and economic crisis in 2020.

Profil de recherche de mots clés liés à la consommation
© Nicolas de Roux, 2021.

Éléments de bibliographie

CHOI, Hyunyoung et VARIAN, Hal, 2012. Predicting the present with Google Trends. *Economic record*, juin 2012, vol. 88, n° s1, pp. 2-9.

FERRARA, Laurent et SIMONI, Anna, 2019. *When are Google data useful to nowcast GDP? An approach via pre-selection and shrinkage* [en ligne]. S. L. : Banque de France, Eurosystème, 30 p. Working paper n° 717. Disponible sur : https://publications.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/wp717.pdf (consulté le 13.04.2022).

GIANNONE, Domenico, REICHLIN, Lucrezia et SMALL, David, 2008. Nowcasting: The real-time informational content of macroeconomic data. *Journal of Monetary Economics* [en ligne], mai 2008, vol. 55, n° 4, pp. 665-676. DOI: 10.1016/j.jmoneco.2008.05.010.

Olivier DELORME

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Eurazeo

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Alexandre DEWEZ, VC Associate

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Franck BANCEL, président du département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

Cadre analytique pour l'évaluation des entreprises en phase de démarrage

Mots-clés : capital risque, investissement, technologie

Contexte

J'ai effectué mon projet de fin d'études (PFE) en tant qu'analyste chez Eurazeo. Ce fonds d'investissement en capital-risque est un acteur historique du financement des entreprises technologiques européennes en forte croissance. J'étais impliqué dans l'équipe agnostique "*digital ventures*" qui investit des tickets de 1 m€ à 10 m€ à travers l'Europe.

Le capital-risque est un métier de l'investissement non côté fascinant à bien des égards. D'abord, car la classe d'actif sous-jacente, qu'est une jeune société en forte croissance, est une aventure entrepreneuriale, technologique et humaine profondément liée à la société, ce qui la rend passionnante.

Ensuite, car le capital-risque est un métier très pauvre en signaux. La décision d'investissement repose sur une disponibilité structurelle de matière à analyser qui est marginale à côté des métiers du LBO plus traditionnels. Les méthodes de valorisation quantitative utilisées dans les investissements dans d'autres classes d'actifs (infrastructures, ETIs, marché d'actions *etc.*) sont dans l'ensemble principalement quantitatives.

Missions et objectifs

- La recherche de nouvelles opportunités d'investissement sur des marchés porteurs
- La définition d'une thèse d'investissement sur un sujet de recherche approfondi durant la totalité de mon stage
- Le support au diagnostic des sociétés ciblées par le fonds d'investissement

Résumé

L'évaluation des entreprises en phase d'amorcage n'est pas aussi quantitative et scientifique que celle des entreprises en phase d'accélération ou des actifs établis (*buyout*, infrastructure, immobilier *etc.*). Elle nécessite de manipuler des cadres qualitatifs et des métriques quantitatives qui sont moins bien définies que les instruments financiers traditionnels. Lors de ce projet de fin d'études, j'ai eu l'opportunité de préciser un cadre de réflexion pour l'évaluation d'une start-up et le décliner par type de modèle d'affaires (incl., SaaS B2B, marketplace, API, consumer).

Le capital-risque se décompose en deux approches pour engager une prise de décision d'investissement. La première consiste à évaluer, selon une approche *top-down*, si le modèle économique est prometteur, indépendamment d'une entreprise cible. Il s'agit essentiellement de la définition d'une thèse d'investissement sur un marché. La deuxième est une approche *bottom-up*, qui part des signaux d'une start-up (y compris les mesures existantes financières et extra financières, la voix du client, les entretiens avec les dirigeants *etc.*).

Analyse et calcul économique
Economic Calculus and Analysis

Conseil et Expertise
Consulting & Auditing

Data Science

Finance d'entreprise
Corporate Finance

Financement de projets
Project Finance

Machine Learning

Marchés financiers
Financial Markets

Politiques publiques
Public Policy

Thématiques transversales
Cross-cutting themes

Analytical framework for early-stage companies' evaluation

Keywords: venture capital, technology, investment

Context

I did my final year project as an analyst at Eurazeo, a venture capital investment fund and a long-standing player in the financing of fast-growing European technology companies. I was involved in the agnostic "digital ventures" team which invests € 1m to € 10m minority tickets across Europe.

Missions and goals

My mission can be divided into three sub-missions:

- *The sourcing for new investment opportunities in promising markets.*
- *The definition of an investment thesis on an in-depth research subject pursued for the duration of my internship.*
- *Support for the diagnosis of companies targeted by the investment fund.*

Abstract

Valuation of early stage companies is not as quantitative and scientific as valuation of accelerating companies or established assets (buyout, Infrastructure, Real Estate, etc.*). It requires the manipulation of qualitative frameworks as well as quantitative metrics that are less well defined than traditional financial instruments. During this final year project, I had the opportunity to specify a framework for the valuation of a startup and break it down by type of business model (incl. SaaS B2B, marketplace, API, consumer).*

Venture capital can be broken down into two approaches to making an investment decision. The first is to assess, in a top-down approach, whether the business model is promising, independent of a target company: essentially defining an investment thesis in a market. The second approach, which usually but not always follows, is a bottom-up approach, which starts from a startup's signals (including existing financial and extra-financial metrics, voice of the customer, interviews with executives, etc.*).*

Éléments de bibliographie

BAROUDY, Kim, JANMARK, Jonathan, SATYAVARAPU, Abhi *et al.*, 2020 Europe's startup ecosystem: Heating up, but still facing challenges. *McKinsey and Company* [en ligne], 11 octobre 2020. Disponible sur : https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/europes-start-up-ecosystem-heating-up-but-still-facing-challenges (consulté le 13.04.2022).

BOTTERI, Philippe, PURANDARE, Varun et DU FRETAY, Candice, 2021. 2021 Accel Euroscape: On the path to global dominance?. *accel.com* [en ligne], 22 octobre 2021. Disponible sur : https://www.accel.com/noteworthy/2021-accel-euroscape-on-the-path-to-global-dominance (consulté le 13.04.2022).

ZIDER, Bob, 1998. How venture capital works. *Harvard business review*, novembre-décembre 1998, vol. 76, n° 6, pp. 131-139.

Louise GUITTON

Élève ingénieure concours commun
Parcours Ingénierie financière

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Laboratoire Aguettant

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Éric TORT, secrétaire général

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pierre BERTRAND, responsable académique, département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Analyse économique de la performance industrielle – Analyse des coûts de non-qualité

Mots-clés : coûts de non-qualité, performance, industrie, contrôle de gestion industriel, pilotage

Contexte

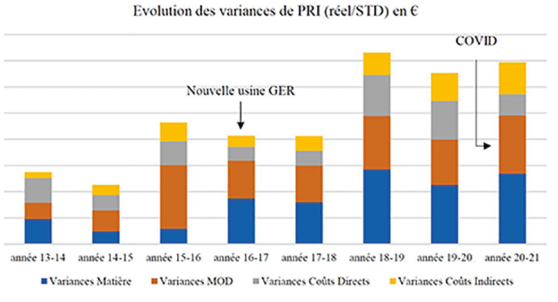
Aguettant est un laboratoire pharmaceutique dédié au développement, à la fabrication et à la commercialisation de spécialités pharmaceutiques injectables. Il s'agit d'une entreprise familiale et internationale. Dans l'industrie pharmaceutique, les procédés et réglementations sont lourds et visent à assurer au patient l'excellente qualité des produits ainsi qu'une sécurité totale. Ces exigences ont un coût pour l'entreprise. Afin de les intégrer le plus justement au prix de revient industriel du produit, Aguettant possède un modèle économique précis. Malgré cela, l'entreprise observe des écarts de coûts inexpliqués. Ces variances sont appelées en interne « coûts de non-qualité ».

Missions et objectifs

Depuis plusieurs années, un suivi de ces écarts est réalisé, et quelques pistes de réflexion avaient été proposées. Aguettant souhaitant aujourd'hui relancer ce dossier, la mission vise à réaliser l'analyse économique de ces variances et à améliorer la performance industrielle de l'entreprise en identifiant des leviers d'action.

Résumé

La méthode des prix standards appliquée chez Aguettant permet de comparer les coûts réels aux coûts théoriques de production et d'isoler ainsi les variances et donc les coûts de non-qualité. Afin de piloter la performance de l'entreprise de la façon la plus juste, l'objectif est d'obtenir des prix standards aussi proches que possible des prix réels. À travers l'analyse des coûts de non-qualité, il est possible d'ajuster ces coûts standards et d'améliorer la performance de l'entreprise. Après l'étude des coûts standards, la phase de diagnostic des variances a permis de retracer les groupes de coûts à l'origine des écarts et d'en suivre l'évolution. Leur analyse aboutit à l'identification des principales causes et donc, à des leviers d'action immédiats pour l'entreprise. L'objectif étant d'intégrer les problématiques industrielles et les exigences pharmaceutiques à l'analyse économique pour améliorer la performance globale de l'entreprise. À l'issu du projet, une feuille de route aboutie comprenant dix thématiques associées à des leviers d'action concrets, a été rédigée. Les résultats ont été partagés avec les différents services concernés qui sont maintenant pilotes du changement.



Évolution des variances de PRI (réel/STD) © Louise Guitton, 2021.

Economic analysis of industrial performance – Analysis of non-quality costs

Keywords: non-quality costs, performance, industry, industrial management control, steering

Context

Aguettant is a pharmaceutical laboratory dedicated to the development, manufacture, and marketing of injectable pharmaceutical specialties. It is a family-owned and international company. In the pharmaceutical industry, the processes and regulations are strict and aim to ensure excellent quality and total safety for the patient. These requirements have a cost for the company. To integrate these costs as accurately as possible into the industrial cost price of the product, Aguettant has a precise economic model. Despite this, the company observes unexplained cost variances, which are called "non-quality costs".

Missions and goals

For several years now, these variances have been monitored and several approaches have been developed to deal with them. Aguettant now wishes to relaunch this effort. The mission aims to carry out an economic analysis of these variances and to improve the company's industrial performance by identifying action levers.

Abstract

The standard price method applied at Aguettant makes it possible to compare actual costs with theoretical production costs and thus to isolate variances and therefore non-quality costs. To manage the company's performance as accurately as possible, the purpose is to obtain standard prices that are as close as possible to actual prices. Through the analysis of non-quality costs, it is possible to adjust the standards and to improve the company's performance. After the study of the standard costs, the variance diagnosis phase made it possible to trace the groups of costs at the origin of the variances and to follow their evolution. Their analysis led to the identification of the main causes of costs and therefore to direct action levers for the company. The objective is to integrate industrial issues and pharmaceutical requirements into the economic analysis to improve the company's overall performance. At the end of the project, a roadmap was drawn up comprising ten themes associated with concrete action levers. The results were shared with the various departments concerned, which are now piloting the change.

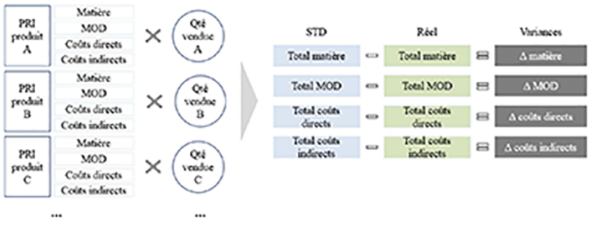


Schéma d'explication des variances © Louise Guitton, 2021.

Éléments de bibliographie

GRANDGUILLOT, Béatrice et GRANDGUILLOT, Francis, 2013. *L'essentiel du contrôle de gestion*. Issy-les-Moulineaux : Gualino, Lextenso éditions, 133 p.

NICOLAS, Berland, CHARPATEAU, Olivier, DREVETON, Benjamin *et al.*, 2013. Dossier 13. Coûts de non-qualité, stratégie et changement. *In*: CAPPELLETTI, Laurent et HOARAU, Christian (dir.). *Finance & contrôle au quotidien*. Paris : Dunod, pp. 393-418.

Julia PEZÉ

Élève ingénieure concours commun
Parcours Ingénierie financière
Master of Science in Management Science and Engineering,
Columbia University, États-Unis

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Goldman Sachs Bank Europe

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Giusy STRUZZIERO, Executive Director

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Henri PHILIPPE, enseignant au département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

L'impact de la crise du Covid-19 sur l'activité des fusions-acquisitions

Mots-clés : fusion-acquisition, liquidités, crise, fonds d'investissement, marché de capitaux

Contexte

Le monde des fusions acquisitions a été particulièrement bouleversé par la crise financière mondiale de 2008. Aujourd'hui, la nouvelle crise économique et financière liée au Covid-19 a un impact sur l'activité M&A qui s'avère très différent de celui de la crise de 2008. Au lieu de connaître un ralentissement, les fusions-acquisitions ont bénéficié d'une nouvelle dynamique, boostant l'activité à des niveaux records.

Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études (PFE) est de comprendre et d'analyser les principales tendances et différences observées sur le marché du M&A pendant la crise du coronavirus par rapport à la crise de 2008-2009. Les deux crises ont été analysées en termes de performance, d'activité de transaction, de conditions de marché et de comportement des différents acteurs, notamment, les fonds de Private Equity.

Résumé

Bien que l'activité M&A ait connu un déclin en volume et en valeur au début de l'année 2020, celui-ci a très rapidement été suivi par un rebond spectaculaire ayant emporté l'activité à des niveaux historiquement élevés à partir de juillet 2020. Cela s'explique, notamment, par le fait que les principaux acteurs responsables des transactions M&A, comme les fonds de Private Equity, ont appris de leurs erreurs suite à la crise de 2008 et ont su tirer profit de la crise du Covid-19 pour booster leur performance en ciblant leurs acquisitions vers des secteurs attractifs. De plus, contrairement à la crise de 2008 au cours de laquelle le marché du financement s'était complètement refermé, les conditions de marché étaient particulièrement favorables pendant le Covid-19, avec des taux historiquement bas facilitant grandement l'accès à la dette. Si de nombreux aspects et étapes d'une transaction ont considérablement changé dans le nouvel environnement post-Covid-19, les différents acteurs du marché se sont rapidement adaptés, conscients des opportunités d'acquisition, de fusion ou de cession qui s'offraient à eux et dont ils n'avaient pas su bénéficier en 2008 par choix (méfiance excessive) ou par contrainte (conditions de marché non favorables).

Analyse et calcul économique
Economic Calculus and Analysis

Conseil et Expertise
Consulting & Auditing

Data Science

Finance d'entreprise
Corporate Finance

Financement de projets
Project Finance

Machine Learning

Marchés financiers
Financial Markets

Politiques publiques
Public Policy

Thématiques transversales
Cross-cutting themes

Impact of the Covid-19 crisis on M&A activity

Keywords: mergers and acquisitions, liquidity, crisis, sponsor, credit market

Context

The Mergers & Acquisitions market was severely hit by the global financial crisis of 2008. We are now in the midst of a new and severe economic and financial crisis which has had a very different impact on M&A activity than 2008. Instead of slowing down, M&A activity has been driven by a new dynamic that has boosted activity to record levels.

Missions and goals

The objective of this study is to understand and analyze the main trends and differences observed in the M&A market during the Coronavirus crisis compared to the 2008-2009 crisis. We analyze the two crises in terms of performance, transaction activity, market conditions, and the behavior of the various players, notably private equity funds.

Abstract

Although M&A activity experienced a decline in volume and value at the beginning of 2020, this was followed very quickly by a spectacular rebound that took activity to historically high levels from July 2020 onwards. This is mainly due to the fact that the main players responsible for M&A transactions, such as private equity funds, learned from their mistakes following the 2008 crisis and managed to boost their performance by targeting attractive sectors for their acquisitions. Indeed, post the 2008 crisis, such players defined new rules and paradigms regarding their investment strategies and take-aways to better face and take advantage of periods of downturn in the future. Moreover, unlike the 2008 crisis when the credit market was completely closed, market conditions were particularly favorable during Covid, with historically low interest rates making access to debt much easier. While many aspects and stages of the classic transaction process have changed considerably in the new post-Covid environment, the various market players have adapted quickly, aware of the acquisition, merger, and disposal opportunities available to them.

Éléments de bibliographie

DE HEREDIA, Tomás, FERNANDEZ-GALIANO, Javier et GARCIA, Mayrin, 2021. The SPACs boom: Europe picks up the pace. *Deloitte Insights* [en ligne], 14 juillet 2021. Disponible sur : https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/financial-services/spacs-in-europe.html (consulté le 13.04.2022).

SALSBERG, Brian, 2020. The Case for M&A in a Downturn. *Harvard Business Review* [en ligne], 17 mai 2020. Disponible sur : https://hbr.org/2020/05/the-case-for-ma-in-a-downturn (consulté le 13.04.2022).

Victor DERUYVER

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière
Master of Science, Management of Technology,
université nationale de Singapour

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Omnes Capital

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Bérengère VANLERBERGHE, directrice, Asset Management

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Arash FARNOOSH, professeur, IFP School

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidentiel

Comment financer des projets d'énergie renouvelable aux revenus non sécurisés ?

Mots-clés : énergies renouvelables, risque, financement de projet, capital investissement

Contexte

Avec la montée des prix de l'électricité ces derniers mois, les tensions à venir sur l'approvisionnement en gaz et la diminution des Capex grâce aux progrès technologiques, les développeurs de projets d'énergies renouvelables souhaitent profiter de l'opportunité et s'affranchir des mécanismes de sécurisation des revenus (Feed-in Tariffs, PPA) afin de maximiser leurs revenus sur un marché haussier.

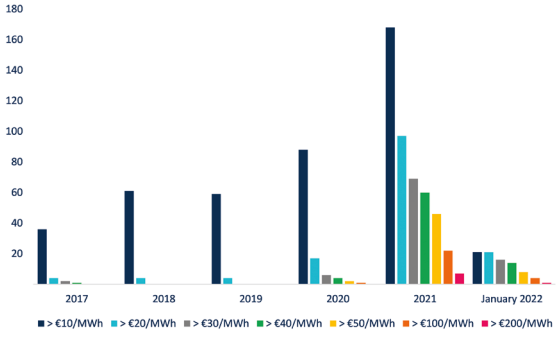
Missions et objectifs

Dans le contexte actuel, un projet aux revenus non sécurisés est plus risqué et peut difficilement contracter de la dette auprès des banques, ce qui empêche l'effet de levier pour un fonds de Private Equity. L'objectif du projet de fin d'études (PFE) est d'étudier différentes structures financières qui permettraient de maintenir un multiple sur investissement satisfaisant en profitant de la tendance haussière des marchés de l'électricité.

Résumé

Après avoir présenté le fonctionnement d'un fonds d'Infrastructure Private Equity et les différents stades de développement de projets renouvelables, j'ai réalisé une cartographie des mécanismes de support pour ces projets. Ces mécanismes de support – tels que des subventions, Feed-in Tariffs, PPA – ont initialement vu le jour afin d'aider financièrement le secteur de la production d'énergie renouvelable qui souffrait d'un coût de revient trop élevé et donc, trop peu compétitif par rapport aux autres sources d'énergie. De tels mécanismes garantissent un prix fixe de revente de l'électricité sur 10 à 20 ans, ce qui permet aux développeurs de contracter facilement de la dette de financement de projet grâce aux revenus sécurisés à long-terme.

Avec des Capex en déclin et un marché de l'électricité haussier ces derniers mois, vendre sa production d'électricité renouvelable sur le marché devient de plus en plus attractif au vu de la différence grandissante entre les prix contractés et les prix en vigueur sur le marché. Cependant, même si les revenus sont plus élevés, les banques restent réticentes à financer de tels projets car elles devraient supporter le risque de fluctuation des prix de revente de la production, ce qui n'est pas le cas quand les prix sont sécurisés. À l'aide de plusieurs scénarii, j'ai observé qu'un fonds de Private Equity qui soutient des développeurs de projets d'énergie renouvelable peut obtenir des multiples d'investissement similaires aux scénarii avec une production entièrement contractée. La hausse des revenus liée à la vente sur le marché permet ainsi de compenser la baisse d'un *gearing* de 55-60 % à 30-40 %.



Volatilité croissante des prix de marché de l'électricité (UK), une opportunité pour les projets non contractés © Victor Deruyver, 2022.

How to finance renewable energy projects with unsecured revenues

Keywords: renewable energy, risk, project finance, private equity

Context

With the rise in electricity prices in recent months, the upcoming tensions on gas supply, and the decrease in Capex thanks to technological advances, renewable energy project developers want to take advantage of the opportunity and free themselves from revenue security mechanisms (feed-in tariffs, PPA) in order to maximize their revenues in a rising market.

Missions and goals

In the current context, a project with unsecured revenues is riskier and can hardly contract debt from banks for project financing, which prevents leverage for a private equity fund. The objective of the final year project is to study different financial structures that would allow to maintain a satisfying multiple on investment by taking advantage of the upward trend of the electricity markets.

Abstract

After presenting the structure of an Infrastructure Private Equity fund and the different stages of development of renewable projects, I mapped the support mechanisms for these projects. These support mechanisms, such as subsidies, Feed-in Tariffs, and PPAs, were initially created to financially support the renewable energy production sector which was suffering from high production costs and therefore was not competitive with other energy sources. Such mechanisms guarantee a fixed resale price for electricity over 10 to 20 years, allowing developers to easily take on project finance debt thanks to secure long-term revenues.

With Capex declining and the electricity market rising in recent months, selling renewable electricity generation into the market is becoming increasingly attractive as the difference between contracted and prevailing market prices widens. However, even if the revenues are higher, banks are currently reluctant to finance such projects as they would have to bear the risk of fluctuating resale prices of the production, which is not the case when prices are secured.

Using several scenarios, I observed that a private equity fund supporting renewable energy project developers can achieve similar investment multiples to those generated by fully contracted generation scenarios. The increase in revenue from market sales thus compensates for a decrease in gearing from 55-60% to 30-40%.

Multiples sur investissement selon le *gearing* et le niveau de sécurisation des revenus des projets
© Victor Deruyver, 2022.

Éléments de bibliographie

DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE et RINOMICS, 2020. *Final Report Summary. Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments*. Bruxelles : Commission européenne, 63 p.

PERCEBOIS, Jacques, 2014. Les mécanismes de soutien aux énergies renouvelables, forces et faiblesses. *La Revue de l'énergie*, janvier-février 2014, n° 617, pp. 5-17.

SUNIO, Varsolo, MENDEJAR, Jaime et NERY, Justin R., 2021. Does the greening of banks impact the logics of sustainable financing? The case of bank lending to merchant renewable energy projects in the Philippines. *Global Transitions*, vol. 3, pp. 109-118.

Alice GREPT

Élève ingénieure concours commun
Parcours Ingénierie financière

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
EDF Renouvelables

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Alexis CHALOT, directeur Microgrid

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Frédéric LANTZ, professeur, IFP School

École des Ponts ParisTech

La transition énergétique dans les zones isolées : le *microgrid* une solution privilégiée ?

Mots-clés : énergies renouvelables, *microgrid*, transition énergétique, zones non interconnectées, batteries

Contexte

Lors de la COP26 à Glascow, des nombreux États insulaires se sont réunis au sein du Climate Vulnerable Forum pour alerter sur l'ampleur des impacts du changement climatique auxquels ils font face. Ces pays ont demandé de relever les objectifs de décarbonation d'ici 2025 pour éviter des changements radicaux, comme la montée des eaux ou encore une désertification accrue de certaines zones. Réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre (GES) devient une priorité pour de nombreux États et les amène à repenser leur système énergétique.

Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études (PFE) était de contribuer au développement et à l'industrialisation de nouvelles offres combinées énergies renouvelables et batteries, destinées aux zones isolées à l'international (développement commercial, réponse à appels d'offres, analyse des opportunités, mise en oeuvre des projets et partenariats).

Résumé

Les zones isolées, typiquement des États insulaires ou des déserts, sont particulièrement vulnérables aux impacts du changement climatique. Face à cette prise de conscience, ces pays tentent de réduire drastiquement leurs émissions de GES et sont amenés à repenser leur système énergétique. Cette étude tente de comprendre les enjeux de la transition énergétique de ces zones et de l'intégration des énergies renouvelables en se concentrant sur les *microgrids*, des systèmes énergétiques hybrides composés de moyens de production renouvelables et de systèmes de stockage. La transition énergétique des zones insulaires est un sujet qui a concentré de nombreuses recherches au cours des dernières années. Ces géographies, de tailles réduites, avec généralement de fortes ressources renouvelables, sont parfois considérées comme des laboratoires pour le déploiement de nouvelles technologies et modèles. Dans le monde académique, la transition énergétique des îles est grandement favorisée par l'installation de batteries qui permettent de contrebalancer les problèmes de stabilité du réseau engendrés par l'intermittence des renouvelables. En fonction de l'objectif principal, le design de ces systèmes hybrides dépendra de critères économiques uniquement ou intégrera également des critères environnementaux ou opérationnels. Cette étude présente un modèle simplifié d'un *microgrid* composé d'une centrale photovoltaïque et d'un système de batteries et discute des économies réalisées et des émissions de CO_2 évitées et identifie les principaux obstacles à la transition énergétique.

PV plant © Kelly L., 2019 (source : Pexels).

Analyse et calcul économique
Economic Calculus and Analysis

Conseil et Expertise
Consulting & Auditing

Data Science

Finance d'entreprise
Corporate Finance

Financement de projets
Project Finance

Machine Learning

Marchés financiers
Financial Markets

Politiques publiques
Public Policy

Thématiques transversales
Cross-cutting themes

Energy transition in isolated areas: the microgrid as preferred solution?

Keywords: renewable energy, microgrid, energy transition, battery

Context

At COP26 in Glasgow, many island states came together at the Climate Vulnerable Forum to warn of the scale of the climate change impacts they face. These countries have asked to raise the decarbonization targets by 2025 to avoid radical changes such as rising sea levels or increased desertification in certain areas. Drastically reducing greenhouse gas emissions is becoming a priority for many states and is leading them to rethink their energy systems.

Missions and goals

Contribute to the development and industrialization of new combined Renewable Energy and Battery offers for isolated areas on an international scale (commercial development, response to calls for tender, analysis of opportunities, implementation of projects and partnerships).

Abstract

Isolated areas, typically island states or deserts, are particularly vulnerable to the impacts of climate change (such as rising sea levels, cyclones, desertification). Faced with this awareness, these countries are trying to drastically reduce their greenhouse gas emissions and are forced to rethink their energy systems.

This study attempts to understand the challenges of energy transition in these areas and the integration of renewable energies by focusing on microgrids, hybrid energy systems composed of renewable production means and storage systems.

The energy transition of island areas has been the focus of much research in recent years. These small geographies, generally with strong renewable resources, are sometimes considered as laboratories for the deployment of new technologies and models. In the academic world, the energy transition of islands is greatly aided by the installation of batteries to counterbalance the grid stability problems caused by the intermittency of renewables. Depending on the main objective, the design of these hybrid systems will depend on economic criteria only or will also integrate environmental or operational criteria. This paper presents a simplified model of a microgrid composed of a PV plant and a battery system and discusses the cost savings of such a project and the CO_2 emissions avoided by it. Finally, the main obstacles to energy transition are identified: the lack of political will and regulatory frameworks for renewable projects as well as economic obstacles such as difficult access to financing for some geographies.

Wind plant © Ricardo Esquivel, 2020 (source : Pexels).

Antoine NOTHIAS

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière
Master of Finance, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, États-Unis

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Meridiam

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Romain LIMOUZIN, COO Americas

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pierre BERTRAND, responsable académique, département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Les schémas de financement de la résilience, l'outil PPP face au déréglement climatique

Mots-clés : infrastructure, financement, résilience, catastrophes, risques

Contexte

Ce projet de fin d'études (PFE) s'est déroulé entre juillet et décembre 2021 au sein du bureau new-yorkais de Meridiam, un fonds d'investissement, développeur et gestionnaire d'infrastructures publiques. Société à mission, la thèse d'investissement de Meridiam repose sur l'idée que la durabilité doit être intégrée au financement, à la conception, à la construction, à l'exploitation et à la maintenance à long terme des projets d'infrastructure.

Missions et objectifs

Il s'agissait d'identifier des projets répondant aux critères d'investissement de Meridiam, de sélectionner des partenaires et de préparer des accords de groupement, ainsi que l'analyse qualitative et quantitative des risques, la structuration/modélisation financière et la mise en place du financement, la revue et la négociation de la documentation, la participation à la préparation des offres et au processus de décision d'investissement interne.

Résumé

Ce rapport aborde la problématique du financement des projets d'infrastructure dédiés à la résilience aux risques de catastrophes naturelles. Si les bénéfices socio-économiques de l'intégration des solutions techniques de résilience dans la conception, la construction et la maintenance des infrastructures ne sont plus à démontrer sur le cycle de vie des actifs, les surcoûts d'investissement initiaux constituent souvent un obstacle majeur pour les autorités publiques. Ainsi, le recours à des partenariats public-privé, permettant de mobiliser l'expertise et les ressources de financement privées, apparaît comme une alternative pour accélérer le développement des projets de résilience, à condition de structurer adéquatement les projets. En effet, les partenariats public-privé requièrent des flux de capitaux stables et sûrs, défi complexe pour les infrastructures résilientes dont les bénéfices futurs sont difficilement « captables » par le secteur privé. Différents schémas existent : levée d'une nouvelle taxe, création de districts à vocation spéciale pour garantir les paiements de disponibilité assurés par des autorités locales, partage des profits réalisés sur les primes d'assurances grâce à la réduction des risques, levée d'obligations vertes basées sur des mesures d'efficacité des solutions de résilience, *etc*. Les études de cas des projets "Fargo-Moorhead Metropolitan Area Flood Risk Management Project" et "Texas Coastal Resiliency Project" montrent comment ces outils et structures théoriques sont mis en pratique, et démontrent leur faisabilité.

FM Area Diversion Project © Tammy Jo Anderson, 2016, CC-BY-SA 4.0 (source : Wikimedia Commons).

Resilience financing schemes and the P3 tool in the face of climate change

Keywords: infrastructure, financing, resilience, disasters, risks

Context

My final year project was completed between July and December 2021 at the New York office of Meridiam, an investment fund that develops and manages public infrastructure. As a mission-driven firm built on ESG and SDG values, Meridiam's investment thesis is based on the idea that sustainability can be best achieved if it is incorporated into the financing, design, building, operating, and long-term maintenance of infrastructure projects.

Missions and goals

The assignments included the identification of projects meeting Meridiam's investment criteria; the selection of partners and preparation of consortium agreements; qualitative and quantitative risk analysis; financial structuring/modeling and financing arrangement; review and negotiation of documentation; and participation in the preparation of bids and the internal investment decision process.

Abstract

This report addresses the issue of financing infrastructure projects dedicated to disaster risk resilience. While the socio-economic benefits of integrating technical resilience solutions into the design, construction, and maintenance of infrastructure no longer need to be demonstrated over the lifecycle of assets, the additional initial investment costs are often a major obstacle for public authorities. Thus, the use of public-private partnerships, which can mobilize expertise and financing resources from the private sector, appears to be an alternative for accelerating the development of resilience projects, provided that the projects are properly structured. Indeed, public-private partnerships require stable and secure cash flows, a complex challenge for resilient infrastructures whose future benefits are not easily "captured" by the private sector. Various schemes exist, such as levying new taxes, creating special assessment districts to guarantee availability payments provided by local authorities, sharing profits from insurance premiums due to risk reduction, and raising green bonds based on efficiency measures of resilience solutions. Case studies of the "Fargo-Moorhead Metropolitan Area Flood Risk Management Project" and the "Texas Coastal Resiliency Project" show how these theoretical tools and structures are being put into practice, and demonstrate their feasibility.

Forest fire © Karen Murphy, USFWS, CC0 (source : Pixnio).

Éléments de bibliographie

BIELENBERG, Aaron, KERLIN, Mike, OPPENHEIM, Jeremy *et al.*, 2016. Financing change: How to mobilize private-sector financing for sustainable infrastructure. *McKinsey Center for Business and Environment*, pp. 24-25.

COLGAN, Charles S., 2017. *Financing Natural Infrastructure for Coastal Flood Damage Reduction. Report*. S. L. : Climate change, New England Environmental Finance Center, University of Southern Maine.

HALLEGATTE, Stephane, RENTSCHLER, Jun et ROZENBERG, Julie, 2019. *Lifelines: The resilient infrastructure opportunity*. Washington D. C. : World Bank.

Jules BERTRAND

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière
Master of Engineering in Industrial Engineering and Operations Research, UC Berkeley, États-Unis

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Artefact

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Rafaëlle AYGALENQ, Data Scientist

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Julien REYGNER, chercheur, CERMICS, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 1 an - Confidential

Prédiction des volumes d'appels arrivant dans un centre de service client

Mots-clés : *Machine Learning, forecasting, série temporelle*

Contexte

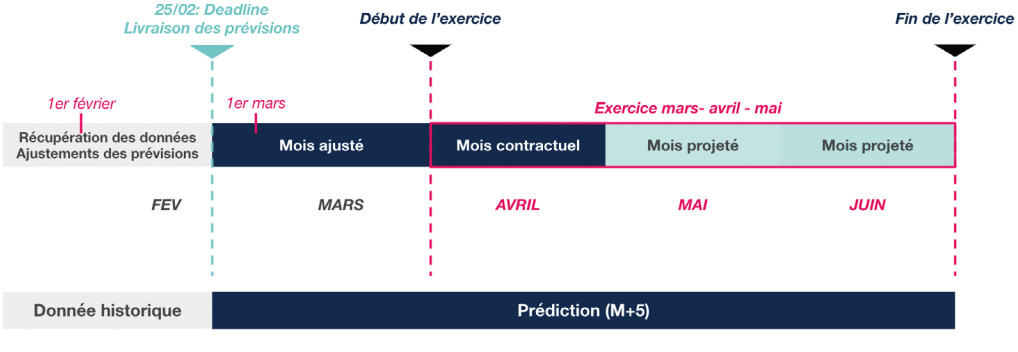
Artefact, entreprise de conseil créée en 2014 et forte de plus de 800 employés dans le monde, vise à réunir 3 grandes activités : le marketing digital, un pôle conseil en *data* et un pôle technologique centré sur le *Big Data* et l'intelligence artificielle. Artefact se donne pour mission d'accélérer la transition digitale de ses clients et d'y intégrer l'intelligence artificielle de bout en bout.

Missions et objectifs

Pendant six mois, pour un grand opérateur télécom français, j'ai participé au développement d'un outil de prédiction du nombre d'appels arrivant dans ses centres d'appels et de service client. L'objectif était d'aider les prévisionnistes et les alloueurs à mieux dimensionner ces centres, en utilisant des algorithmes de "*forecasting*" les plus avancés sur le marché. Le projet comportait 3 axes majeurs : l'architecture du pipeline de données, le modèle de *Machine Learning* et l'exposition des prédictions aux utilisateurs finaux.

Résumé

À partir de l'historique du nombre d'appels présentés et traités sur chacune des files d'appel du service client, il s'agissait de prédire, jusqu'à 5 mois à l'avance, le nombre d'appels quotidiens. La partie modélisation – la plus structurante et challengeante – visait à identifier les variables les plus importantes, le modèle à utiliser, tout en trouvant un moyen de rendre parfaitement compréhensibles les résultats du modèle. En effet, l'une des contraintes les plus importantes du projet consistait à avoir un modèle performant mais dont on soit capable de comprendre la prédiction facilement. De la sorte, les prévisionnistes, qui sont les utilisateurs finaux, peuvent réajuster les résultats *a posteriori* s'ils jugent que l'effet de telle vacance ou tel événement imprévu n'est pas suffisamment pris en compte par le modèle. Les parties déploiement du modèle et accessibilité des résultats, ainsi que la partie mise à l'échelle ont suivi. Chaque file d'appel possédant ses propres spécificités, il était difficile de faire un seul modèle générique. Nous avons donc opté pour un modèle par file afin d'améliorer nos performances. Les résultats de prédiction étaient rendus accessibles *via* une application web développée sur PowerBI.



Explication et exemple de l'horizon de prédiction du modèle © Jules Bertrand, 2021.

Analyse et calcul économique
Economic Calculus and Analysis

Conseil et Expertise
Consulting & Auditing

Data Science

Finance d'entreprise
Corporate Finance

Financement de projets
Project Finance

Machine Learning

Marchés financiers
Financial Markets

Politiques publiques
Public Policy

Thématiques transversales
Cross-cutting themes

Forecasting incoming call volumes at a customer call center

Keywords: Machine Learning, forecasting, time series

Context

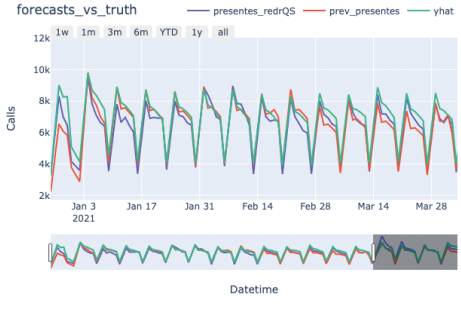
Artefact, a consulting company created in 2014 and with more than 800 employees worldwide, aims to bring together 3 main activities: digital marketing, data consulting, and a technology division focused on Big Data and Artificial Intelligence. Artefact's mission is to accelerate the digital transition of its clients and to help them integrate Artificial Intelligence from end to end.

Missions and goals

For six months, I participated in the development of a tool for a major French telecom operator to predict the number of calls arriving at its call and customer service centers in order to help forecasters and allocators better size these centers. Using the most advanced forecasting algorithms on the market, the project had three major focuses: the data pipeline architecture, the Machine Learning model, and the presentation of predictions to end users.

Abstract

From the history of the number of calls presented and handled on each of the customer service call queues, we had to predict the number of daily calls on the call queue up to 5 months in advance. The modeling part of the task was the most structuring and challenging, since it involved understanding which variables were the most important, which model to use, and also which strategy to employ to make the model results perfectly understandable. This was indeed one of the most important constraints of the project: to arrive at a powerful model but one that is also easy to understand. The model allows forecasters, who are the final users, to readjust the results a posteriori if they judge that the effect of a particular vacancy or unforeseen event is not sufficiently taken into account. Finally, the last two challenges concerned the deployment of the model and the accessibility of the results, as well as the task of scaling up. Each call queue having its own specificities, it was difficult to create a single generic model. We therefore opted for one model per queue to improve our performance. The prediction results were made available via *a web application developed on PowerBI.*



Un exemple de prédiction avec Prophet. Réel en rouge, Prophet en violet, Métier en vert. Les samedis sont les jours les plus bas © Jules Bertrand, 2021.

Éléments de bibliographie

KHANDELWAL, Renu, 2019. Time Series Prediction using SARIMAX. *Medium* [en ligne], 6 octobre 2019. Disponible sur : https://medium.datadriveninvestor.com/time-series-prediction-using-sarimax-a6604f258c56 (consulté le 14.04.2022).

TAYLOR, Sean J. et LETHAM, Benjamin, 2017. Forecasting at scale. *PeerJ Preprints* [en ligne]. DOI: 10.7287/peerj.preprints.3190v2.

Thomas MEUNIER

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière
Master Mathématiques de la finance et des données (MFD),
École des Ponts ParisTech, UPEM et INRIA

Promotion 2020

Mission recherche réalisée à :
INRIA Saclay

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Oana BALALAU, chercheuse

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Romuald ELIE, enseignant, université Gustave Eiffel

Détection automatique ou semi-automatique d'entreprises fragilisées par la crise

Mots-clés : apprentissage supervisé, modèles explicables, apprentissage profond

Contexte

Lors du quinquennat du président François Hollande, une des mesures prises par le gouvernement était de venir en aide aux petites et moyennes entreprises (PME), de manière à prévenir au maximum les risques de défaillance. Dans cette optique, des équipes du ministère de l'Économie et des Finances ont été dédiées à l'identification des PME présentant un risque de faillite et à leur accompagnement. Il s'agit là d'une mission relativement délicate, car en économie, il est important de laisser « mourir » certaines entreprises pour que de nouvelles puissent faire leur apparition. Il y a donc un véritable jeu d'équilibre, entre sauver les entreprises qui présentent une forte probabilité de prospérité par la suite, et laisser celles qui pourraient devenir des entreprises dites « zombies », c'est-à-dire, qui ne survivent que par l'aide de l'État.

Missions et objectifs

Le but de ce projet de fin d'études (PFE) était d'améliorer les résultats actuels. Pour cela, plusieurs axes étaient développés. Dans un premier temps, nous avons réalisé un *benchmark* de différents modèles, basé sur une bibliographie spécifique. Pour cette raison, nous avons décidé d'appliquer tous les modèles, que nous avons jugés pertinents, à notre jeu de données. Ensuite, nous avons pris en compte la temporalité, car le modèle semblait trop statique et mesuré l'apport de cet ajout. Puis, nous avons proposé d'évaluer quel serait le modèle le plus pertinent, secteur par secteur, afin d'améliorer un peu plus les résultats. Pour terminer, nous avons analysé l'importance de chacun des *features* dans les modèles pour lesquels cela était possible.

Résumé

Tout d'abord, nous nous sommes intéressé à l'étude de plusieurs modèles et en avons effectué un *benchmark*.

Dans un second temps, nous nous sommes penché sur les données elles-mêmes. Nous nous sommes aperçus que notre jeu de données était statique. Nous avons donc décidé de rajouter des variables, que nous appellerons *features* temporels, afin d'intégrer la temporalité au modèle. Pour la suite de l'étude, nous avons procédé avec ce nouveau *dataset*.

Afin d'améliorer encore un peu plus nos résultats, nous avons entamé des recherches par secteur d'activité. Ce faisant, nous nous sommes rendus compte que si nous appliquions des modèles différents pour chacun des secteurs d'activité, nous obtenions des résultats bien meilleurs.

Enfin, nous nous sommes intérrogé sur l'importance des *features* dans nos modèles.

Automatic or semi-automatic detection of companies weakened by the crisis

Keywords: supervised learning, explainable models, Deep Learning

Context

During the five-year term of President François Hollande, one of the measures taken by the government was to help SMEs (Small and Medium-sized Enterprises), in order to mitigate the risks of failure as much as possible. Within the Ministry of Economy and Finance, teams have been dedicated to the identification of SMEs at risk of bankruptcy and to their support. This is a relatively delicate mission because in economics, it is quite important to let companies "die" so that new ones can appear. It is therefore a real balancing act to save the companies that have a high probability of prospering afterwards and leave those that could become so-called "zombie" companies, which only survive with the help of the government.

Missions and goals

The goal of my internship was to improve the current results. For that, we proceeded on several axes. First, we made a benchmark of different models based on a specific bibliography. To achieve this, we decided to apply all the models that we considered relevant to our dataset. Another important axis to consider was temporality. Indeed, the model was considered as too static, for which reason temporality was added and its contribution measured. Then, in a more fine-tuned way, a sector-by-sector check was performed to see which model would be the most relevant and thereby further improve the results. Finally, we looked at the importance of each feature in the models wherever possible.

Abstract

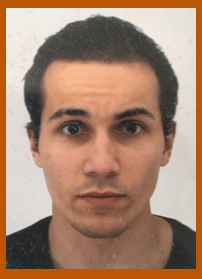
First, we looked at several models and benchmarked them. Second, we looked at the data itself, realizing that our dataset was static. We therefore decided to add variables, which we will call temporal features, in order to take account of temporality in the model. Later, we will proceeded with this new dataset. In order to further improve our results, we started to search by sector of activity. In so doing, we realized that if we applied different models for each of the sectors of activity, we obtained much better results. Finally, we decided to look at the importance of specific features in our models.

Éléments de bibliographie

ALAKA, Hafiz A., OYEDELE, Lukumon O., OWOLABI, Hakeem A. *et al.*, 2018. Systematic review of bankruptcy prediction models: Towards a framework for tool selection. *Expert Systems with Applications*, mars 2018, vol. 94, pp. 164-184.

RIBEIRO, Marco T., SINGH, Sameer et GUESTRIN, Carlos, 2018. Anchors: High-precision model-agnostic explanations. *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, vol. 32, n° 1, pp. 1527-1535.

SHAKERIN, Farhad et GUPTA, Gopal, 2020. White-box induction from SVM models: Explainable ai with logic programming. *Theory and Practice of Logic Programming*, septembre 2020, vol. 20, n° 5, pp. 656-670.



Eddy REDON

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
BNP Paribas

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Jesus BEARDO, trader

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Bernard LAPEYRE, enseignant-chercheur, CERMICS,
École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Couverture optimale du risque de change dans les TRS

Mots-clés : TRS, réseaux de neurones, couverture, risque de devises

Contexte

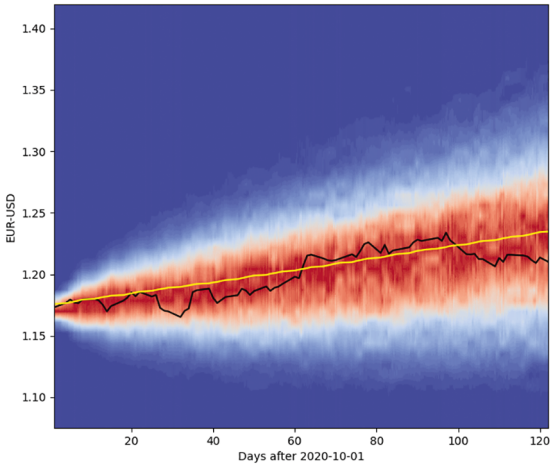
Les *total return swaps* (TRS) sont des produits dérivés qui transfèrent la performance d'un actif détenu par une contrepartie à une autre contrepartie en échange d'intérêts. Comme tout outil financier, les TRS sont soumis à différents risques, parmi lesquels le risque de change dès l'instant où les actifs sous-jacents sont issus de marchés dont les monnaies sont différentes de notre monnaie domestique (dans notre cas l'euro).

Missions et objectifs

Mes missions d'assistant *trader* consistaient à seconder les *traders* de l'équipe, notamment, *via* le développement d'algorithmes et d'outils afin d'améliorer le *reporting* des positions des portefeuilles, ou encore l'automatisation de certaines tâches. En parallèle, j'ai décidé d'étudier la question de la couverture du risque de change dans les TRS grâce aux informations de marché dont je disposais.

Résumé

Pour ce faire, j'ai cherché à réduire autant que possible le risque de change, grâce à des prédictions d'évolutions des taux impliqués dans un TRS. L'objectif étant de prendre la meilleure décision pour couvrir nos positions, plusieurs méthodes peuvent être utilisées : le modèle de Black-Scholes dont les résultats proposent un modèle d'évolution *log-normale* des taux de change, des modèles de séries temporelles de plus en plus complexes afin de mieux rendre compte des comportements des taux (ARIMA et VARMA) et enfin, des modèles de prédiction d'évolutions par des réseaux de neurones. La précision et la fiabilité de ces différentes méthodes ont ensuite été comparées et le modèle de réseaux de neurones récurrents a été retenu afin de prédire les évolutions des taux de change. Ensuite, j'ai conçu un algorithme de couverture qui, à partir des informations de marché dont il dispose (valeurs historiques des taux de change impliqués dans le TRS, valeurs des actions sous-jacentes qui composent le produit), prédit les flux financiers futurs qui seront échangés entre les contreparties. De là, il décide ou non de contracter des options de change afin de maximiser le *cash-flow* reçu en euros. Enfin, l'efficacité de cet algorithme a été éprouvée sur un TRS. Les résultats tendent à confirmer qu'il permet de réduire le risque associé en augmentant de + 12,2 % la value *at risk* de niveau 5 %.



Trajectoires réelles (en noir) et trajectoires prédites moyennes issues de 2 000 simulations de Monte Carlo (en jaune) du taux de change EUR-USD entre le 01/10/2020 et le 01/02/2021 © Eddy Redon, 2021.

Optimal hedging of currency risk

Keywords: TRS, neural networks, hedging, currency risk

Context

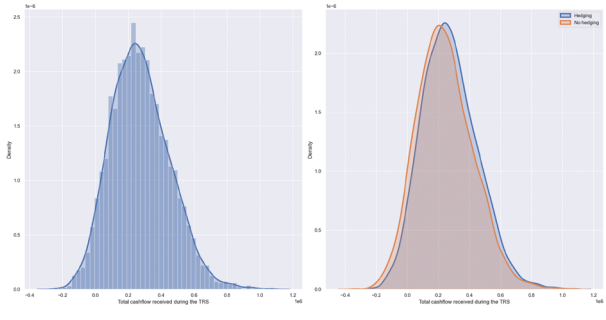
Total return swaps (TRS) are bilateral financial contracts in which one party makes payments based on the return of an underlying asset. Even though TRS are credit derivatives, their owners need to be protected from a currency risk that arises as soon as the underlying assets are provided by foreign markets with currencies that differ from the domestic currency (Euro in our case).

Missions and goals

Next to my tasks as a trading assistant, which involved helping the traders at my desk by developing algorithms and tools to enhance the reporting of the positions of our portfolios or to automate some of their tasks, I decided to tackle the issue of currency risk hedging in TRS.

Abstract

I aimed at reducing the currency risk as much as possible thanks to exchange rates forecasts obtained with different methods in order to hedge our positions in the best way. Among these methods are a log-normal evolution for exchange rates that arises from the Black-Scholes framework; increasingly complex time series models to better reflect exchange rate behaviours (ARIMA and VARMA); and, finally, neural network forecasting models. These different methods were compared in terms of accuracy and reliability, whereupon I picked a recurrent neural network to forecast the exchange rate evolutions. Folowing this, I developed a hedging algorithm capable of predicting future cash flows exchanged between the two parties of a TRS based on market data (historical values of exchange rates and underlying assets) and deciding to buy a FX option or not in order to maximize the received cash flow in Euros. Finally, the efficiency of the algorithm was measured on a TRS which confirmed that our method does reduce the associated risk by increasing a 5% value at risk level by +12,2%



Distribution de la performance du TRS avec couverture (gauche) et comparaison avec le cas non couvert (droite)
© Eddy Redon, 2021.

Éléments de bibliographie

GRAVES, Alex, 2012. *Supervised sequence labelling with recurrent neural networks*. Berlin, Heidelberg : Springer. Studies in Computational Intelligence n° 385.

LIU, Chen, HOU, Weiyan et LIU, Deyin, 2017. Foreign exchange rates forecasting with convolutional neural network. *Neural Processing Letters*, mai 2017, vol. 46, n° 3, pp. 1095-1119.

Loris ANDRÉ

Élève ingénieur concours commun
Parcours Expertise économique
Master Analyse et politique économique (APE), École des Ponts ParisTech, EHESS, ENS, ENSAE, École polytechnique, HEC

Promotion 2020

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Paris School of Economics

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Liam WREN-LEWIS, professeur, PSE, chargé de recherche, INRAE

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pierre BERTRAND, responsable académique, département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

Financer des chaînes durables pour freiner la déforestation ? L'Amazonie brésilienne

Mots-clés : chaînes de production durables, déforestation, forêt amazonienne, financement REDD, doubles différences

Contexte

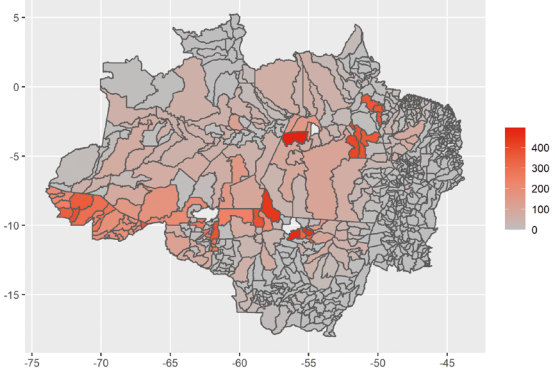
La dégradation et la destruction de la forêt mondiale sont la cause (i) d'environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre et (ii) d'une perte massive de biodiversité (première cause du déclin selon l'IPBES). Il est donc essentiel de cerner les politiques publiques les plus efficaces pour lutter contre ces phénomènes.

Missions et objectifs

L'Amazonie brésilienne est l'une des plus grandes forêts tropicales mondiales. Depuis les années 2000, elle fait l'objet d'une multitude de politiques publiques visant à réduire la déforestation. L'objectif du travail mené est d'appliquer des méthodes d'évaluation de politiques publiques, parmi les plus récentes, afin de déterminer l'effet réel des financements « verts » internationaux sur la déforestation en Amazonie brésilienne.

Résumé

Cette étude propose d'évaluer l'efficacité environnementale de projets dédiés au financement de filières de production durables et encadrés par le programme coordonné par l'ONU visant à réduire les émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD). Pour cela, je m'appuie sur 59 projets menés depuis 2009 par le Fonds Amazonien : le plus grand fonds multilatéral REDD au monde, opérant en Amazonie brésilienne. Même si l'objectif affiché du fonds est de réduire la déforestation, l'efficacité environnementale réelle de ses projets reste à démontrer. Après avoir collecté les données associées aux projets du fonds grâce au "*web scraping*", j'ai réalisé une analyse en double différence avec des instants de traitement multiples, en appliquant une méthode proposée par Callaway et Sant'anna en 2020. Les résultats montrent que le financement de chaînes de production agricole durables pourrait n'avoir eu aucun effet sur les taux de déforestation, contrairement à la classification comme municipalité prioritaire, une autre politique environnementale brésilienne. Cependant, les municipalités qui bénéficient des projets du fonds ont connu une augmentation supplémentaire du PIB de 9 % à moyen terme. Cette augmentation peut être due à une croissance de la valeur ajoutée générée dans les secteurs de l'agriculture et des services, grâce à la construction de nouvelles chaînes de production durables.



Déboursements du Fonds Amazonien pour l'appui aux chaînes de production soutenable ($R/km²) © Loris André, 2021.

Financing sustainable chains to curb deforestation? The Brazilian Amazon

Keywords: sustainable production chains, deforestation, Amazon rainforest, REDD finance, difference-in-differences

Context

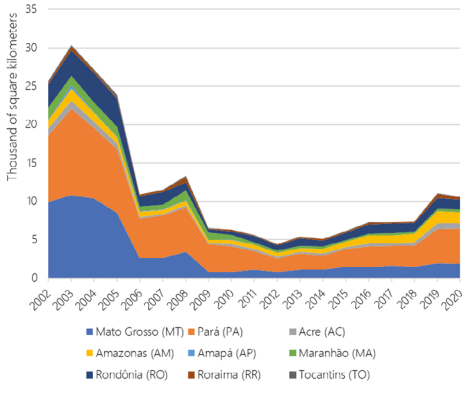
The degradation and destruction of the world's forests are the cause of (i) approximately 10% of greenhouse gas emissions and (ii) a massive loss of biodiversity (the leading cause of decline according to IPBES). It is therefore essential to identify the most effective public policies to fight against these phenomena.

Missions and goals

The Brazilian Amazon is one of the world's largest tropical forests. Since the 2000s, it has been the object of a multitude of public policies aimed at reducing deforestation. The objective of this work is to apply the most recent public policy evaluation methods to determine the real effect of international "green" financing on deforestation in the Brazilian Amazon.

Abstract

This research proposes to assess the environmental effectiveness of projects dedicated to the financing of sustainable production chains and framed by the UN coordinated program aiming at reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD). I rely on 59 projects conducted since 2009 by the Amazon Fund, the world's largest multilateral REDD fund, operating in the Brazilian Amazon. Even if the stated objective of the fund is to reduce deforestation, the real environmental effectiveness of its projects remains to be demonstrated. After collecting the data associated with the fund's projects thanks to web scraping, I conducted a difference-in-differences analysis with multiple treatment timings, applying a method proposed by Callaway and Sant'anna in 2020. I find that financing sustainable agricultural production chains might have had no effect on deforestation rates, unlike classifying priority municipalities, another Brazilian environmental policy. However, municipalities that benefit from the fund's projects have known an additional GDP increase of 9% over the medium term, which may be due to a growth in the value added generated in the agricultural and service sectors thanks to the building of new sustainable production chains.



Taux annuels de déforestation dans les neuf États du biome amazonien brésilien © Loris André, 2021. Données : INPE.

Éléments de bibliographie

CALLAWAY, Brantly et SANT'ANNA, Pedro H. C., 2021. Difference-in-differences with multiple time periods. *Journal of Econometrics*, décembre 2021, vol. 225, n° 2, pp. 200-230.

Oussama BAHIAOUI

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Veolia Environnement

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Philippe HERMANN, Senior VP Sustainable Finance

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Pierre BERTRAND, responsable académique, département Sciences économiques, gestion, finance, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Mise en œuvre de la taxonomie européenne dans une grande entreprise : le cas de Veolia

Mots-clés : taxonomie, durable, règlement, organisation, critère

Contexte

En mars 2020, la Commission européenne a publié le règlement de la taxonomie verte de l'UE, un système de classification des activités économiques qui peuvent être considérées comme durables. Motivées par cette initiative politique, les entreprises ont commencé à travailler sur l'intégration de la taxonomie verte dans leurs systèmes.

Missions et objectifs

Ce projet de fin d'études (PFE) réalisé au sein de la division de la finance durable de Veolia Environnement visait à initier l'application de la taxonomie européenne à l'entreprise en prévision des publications obligatoires à partir de 2022, en apprenant et en documentant les méthodes applicables pour les prochaines applications du système.

Résumé

Ce projet tend à répondre à la problématique de l'application de la taxonomie verte à une entreprise. En pratique, le processus était *bottom-up* : nous avons commencé par le détail de l'application pour arriver enfin à la méthode générale. Dans un premier temps, nous avons travaillé sur des questions liées à l'application élémentaire de la taxonomie verte sur les différents types d'activités de l'entreprise. Ensuite, nous avons travaillé sur la liaison entre les données techniques de l'application de la taxonomie à une activité et les données financières de l'activité. La dernière étape portait sur l'aspect managérial du projet : la consolidation des résultats, l'organisation du calendrier du *reporting*, les ressources humaines et matérielles déployées. Ainsi, ce projet traite de l'ensemble des questions rencontrées lors de l'application de la taxonomie de l'UE, allant des enjeux de gestion, comme l'organisation de l'opération du *reporting* taxonomique, aux défis techniques, tels que l'application d'un critère de sélection à une activité.

Objectifs environnementaux de l'Union Européenne © EU Technical expert group on Sustainable Finance, 2020, CC-BY-SA 4.0 (source : European Commission).

Analyse et calcul économique
Economic Calculus and Analysis

Conseil et Expertise
Consulting & Auditing

Data Science

Finance d'entreprise
Corporate Finance

Financement de projets
Project Finance

Machine Learning

Marchés financiers
Financial Markets

Politiques publiques
Public Policy

Thématiques transversales
Cross-cutting themes

Implementation of the European Taxonomy at a large company: the case of Veolia

Keywords: taxonomy, sustainable, regulation, organization, criteria

Context

In March 2020, the European Commission published the EU Green Taxonomy, a classification system of economic activities that can be considered environmentally sustainable. Motivated by this policy initiative, corporations have started working on integrating Green Taxonomy into their systems.

Missions and goals

I realized my final year project at the sustainable finance division of Veolia Environnement. The project's objective was to initiate the EU Taxonomy's application to the company in anticipation of the mandatory disclosures beginning in 2022 by learning and documenting applicable methods for the coming applications of the system.

Abstract

My project concerns the problematic of applying the Green Taxonomy to a company. In practice, the process of working on this problematic was bottom-up : we started with the smallest details of the application of the texts to finally arrive at the general method. First, we worked on the basic application of the Green Taxonomy to the different types of activities at the company. Then, we worked on the link between the technical data of the application of the Taxonomy to an activity and the financial data of the activity. The last step concerned the management side of the project: the consolidation of results, the organization of the reporting schedule, and the human and material resources deployed. As a result, the project treats the integral scope of problematics encountered while trying to apply the EU Taxonomy, ranging from managerial questions, such as how the operation should be organized, to technical issues, such as how to apply screening criteria to an activity.

Croissance vers une finance durable © Romolo Tavani, 2016 (source : iStock).

Maxime BARTHE

Élève ingénieur concours commun
Parcours Ingénierie financière
Master of Science in Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Suède

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Banque de France

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Pauline LEZ, manager opérationnel et stratégique

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Eva ALFREDSSON, chercheuse, Division of Sustainable development, Environmental science and Engineering (SEED), Royal Institute of Technology (KTH)

Intégration des enjeux climatiques dans les programmes d'achats d'actifs de l'Eurosystème

Mots-clés : score climatique, politique monétaire, achats d'actifs, secteur des entreprises, Eurosystème

Contexte

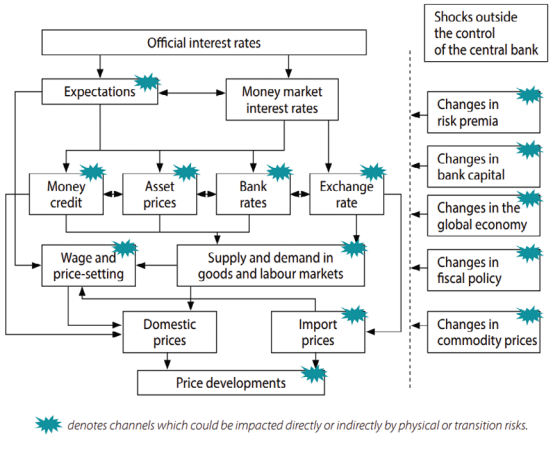
La nouvelle revue stratégique de la Banque centrale européenne, dévoilée en juillet 2021, place le changement climatique au cœur de sa nouvelle stratégie de politique monétaire. Le changement climatique affectant la stabilité des prix, à la fois, à travers les risques physiques et les risques de transition, ses considérations et ses conséquences appartiennent donc de fait au mandat principal de l'Eurosystème.

Missions et objectifs

Cette étude vise à développer un score permettant d'intégrer les enjeux climatiques dans les achats d'actifs du secteur des entreprises de l'Eurosystème. Cette « note climatique », attribuée à chaque émetteur éligible, doit être rigoureuse et pertinente pour guider une réallocation progressive des fonds vers les meilleurs émetteurs éligibles (enveloppe verte) et à l'écart des pires (enveloppe brune), à la fois en termes de risques climatiques et en termes de transition écologique.

Résumé

Cette étude combine des données de politique monétaire et des données climatiques afin de créer un score climatique pour chaque émetteur éligible aux achats d'actifs de l'Eurosystème. Elle se concentre sur les achats d'actifs du secteur des entreprises, à savoir le Corporate Sector Purchase Programme (CSPP) et la partie privée du Pandemic-Emergency Purchase Programme (PEPP). Elle présente d'abord la construction du score climatique, basé sur des données rétrospectives, prospectives et de divulgation de données extra-financières, afin de le rendre robuste aux critiques, robuste dans le temps, mais aussi, flexible. Elle analyse ensuite les résultats empiriques du score climatique et leurs implications opérationnelles sur la réallocation des fonds. Elle conclut que la réallocation des fonds est fortement influencée par l'asymétrie de l'univers éligible. Elle montre la nécessité d'une plus grande granularité, tant pour la taxonomie des secteurs que pour les scores et les enveloppes. Enfin, elle met en évidence la relation entre la conception finale du score et les objectifs politiques qu'il sert, qu'il s'agisse de financer la transition écologique, d'une protection purement bilantaire, ou d'une combinaison des deux.



Impact of climate risks on monetary policy transmission channels
© NGFS, 2020.

Incorporating climate change in the Eurosystem's asset purchase programmes

Keywords: climate change score, monetary policy, asset purchases, corporate sector, Eurosystem

Context

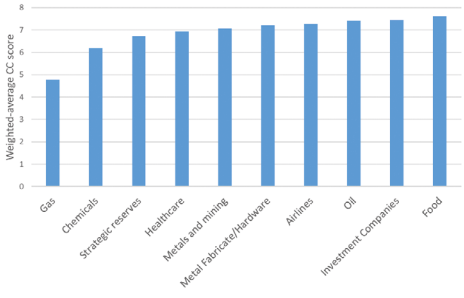
The European Central Bank's new strategy review, unveiled in July 2021, has placed climate change at the core of monetary policy strategy. As climate change affects price stability through physical and transition risks, climate change considerations belong to the Eurosystem's primary mandate.

Missions and goals

This study aims to develop a score for incorporating climate change in the Eurosystem's corporate sector asset purchases. This climate change score would give a "climate grade" to each eligible issuer. This grade would enable the implementation of a consistent tilting of purchases, i. e., *a progressive reallocation of funds towards the best eligible issuers (green envelope) and away from the worst (brown envelope), in terms of both climate risks and green transition.*

Abstract

This study combines monetary policy and climate data to develop Climate Change scores for each eligible issuer. It focuses on the corporate sector asset purchases instrument, namely the Corporate Sector Purchase Programme (CSPP) and the private sector part of the Pandemic-Emergency Purchase Programme (PEPP). The paper first sets forth the construction of the Climate change score, built on backward-looking, forward-looking, and disclosure metrics, to make it robust against critics, robust over time, but also scalable to ensure feasibility. It then analyses the empirical results and the score's operational implications on the tilting. It concludes that the tilting is heavily influenced by the asymmetry of the eligible universe. It also elucidates the need for more granularity in the sector's taxonomy, the scores, and the envelopes. Finally, it shows how the final design depends on policy objectives, whether these entail financing the green transition, a sheer balance-sheet protection, or a combination of both.



Last ten sectors by weighted-average CC score
© Maxime Barthe, 2021.

Éléments de bibliographie

NETWORK FOR GREENING THE FINANCIAL SYSTEME (NGFS), 2021. *Adapting central bank operations to a hotter world. Reviewing some options*. Technical document. S. L. : NGFS Secretariat, Banque de France Eurosystème, 56 p. Disponible sur : https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2021/06/17/ngfs_monetary_policy_operations_final.pdf (consulté le 10.11.2021).

S. N., 2021. Greening our Corporate Bond Purchase Scheme (CBPS). *Bank of England* [en ligne], 5 novembre 2021. Disponible sur : https://www.bankofengland.co.uk/markets/greening-the-corporate-bond-purchase-scheme (consulté le 01.12.2021).

Côme CHERITEL

Élève ingénieur polytechnique
Parcours Expertise économique
Master Analyse et politique économique (APE), École des Ponts ParisTech, EHESS, ENS, ENSAE, École polytechnique, HEC

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Inspection générale des Finances

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Antonin NGUYEN, inspecteur des finances

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
M. Gabriel ZUCMAN, Associate Professor of Economics, UC Berkeley, États-Unis

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - durée illimitée - Confidential

Analyse de l'impact de la facturation électronique pour l'administration fiscale

Mots-clés : politique publique, fiscalité, économie

Contexte

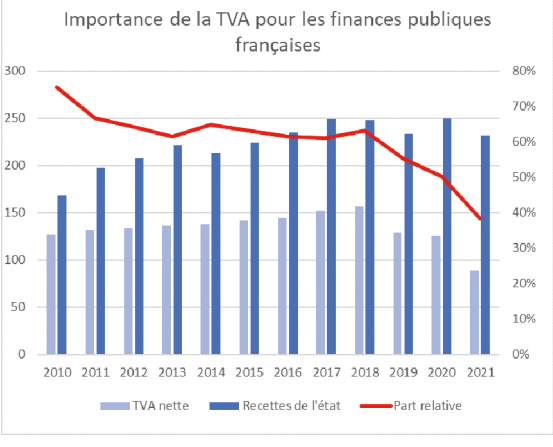
Le gouvernement français projette une obligation de facturation électronique entre les entreprises, en témoigne l'article 153 de la loi de finance pour 2020. Dans ce contexte, une demande de dérogation aux articles 178, 218 et 232 de la directive 2006/112/CE, dite « directive TVA », est nécessaire et se doit de mettre en évidence les bénéfices offerts par cette réforme, ainsi que leur caractère proportionné.

Missions et objectifs

Dans ce cadre, l'Inspection générale des Finances (IGF) a été missionnée pour faire une estimation quantitative et qualitative desdits bénéfices. Il s'agit donc de mettre en évidence, d'une part, les gains financiers résultant de cette réforme et, d'autre part, d'analyser d'autres formes de gains résultant de la réforme, ainsi que de pointer d'éventuels freins à sa bonne mise en place.

Résumé

Durant cette mission, j'ai effectué, pour l'IGF, un travail de chiffrage des gains en matière de réduction des irrégularités de TVA, rendus possibles par la réforme proposée. Tout d'abord, en considérant les études *ex post* menées par certains pays, je conclus qu'un gain à court terme de l'ordre du milliard d'euros est à attendre grâce au changement de comportement déclaratif des entreprises. En outre, en considérant les données du contrôle fiscal, au moyen d'un modèle de type *random forest*, et suite à la consultation d'un groupe d'experts du contrôle fiscal, j'extrapole une réduction de l'écart de TVA correspondant à environ X % de l'écart de TVA sur les années 2013 à 2016, soit un ordre de grandeur d'environ Y milliards d'euros. En conséquence, malgré les incertitudes sur ces chiffres, les bénéfices permis par une obligation de facturation électronique en B2B présentent le caractère proportionné requis par la procédure de dérogation. Ainsi et suivant nos recommandations, le gouvernement a pu lancer l'ordonnance n° 2021-1190 du 15 septembre 2021 relative à la généralisation de la facturation électronique dans les transactions entre assujettis à la taxe sur la valeur ajoutée et à la transmission des données de transaction lançant la réforme.



Place de la TVA dans les recettes de l'État (2010-2020)
© Côme Cheritel, 2021.

Analysis of the impact of electronic invoicing for tax authorities

Keywords: public policy, taxation, economics

Context

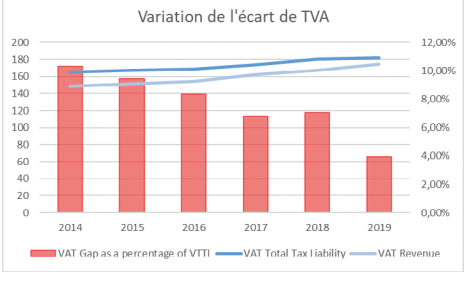
As evidenced by article 153 of the finance law for 2020, the French government is planning an obligation of electronic invoicing between companies. In this context, a request for a derogation to articles 178, 218 and 232 of the 2006/112/CE directive, the so-called VAT directive, is necessary and must highlight the benefits offered by this reform as well as their proportionality.

Missions and goals

The Inspection générale des Finances has been commissioned to make a quantitative and qualitative assessment of the relevant benefits. The aim is, on the one hand, to highlight the financial and other gains resulting from this reform and, on the other hand, to point out possible obstacles to its proper implementation.

Abstract

During this mission, I carried out a quantification of the gains for the tax authorities brought by the proposed reform in terms of the reduction of VAT irregularities. First, considering the ex-post studies carried out by some countries, I conclude that a short-term gain of around one billion euros is to be expected thanks to the change in the declarative behavior of companies. Furthermore, by considering tax audit data, using a random forest model, and following consultation with a group of tax audit experts, I extrapolate a reduction in the VAT gap corresponding to about X% of the VAT gap over the years 2013 to 2016, i.e., an order of magnitude of about Y billion euros. Therefore, despite the uncertainties of these figures, the benefits of mandatory B2B electronic invoicing are proportionate as required by the derogation procedure. Following our recommendation, the government was able to launch the ordinance n° 2021-1190 of September 15, 2021 relating to the generalization of electronic invoicing in transactions between taxpayers subject to value-added tax and to the transmission of transaction data launching the reform.



Variation de l'écart de TVA français (2014-2019)
© Côme Cheritel, 2021.

Éléments de bibliographie

COUR DES COMPTES, 2019. *La fraude aux prélèvements obligatoires. Évaluer, prévenir, réprimer* [en ligne]. Communication au Premier ministre. S. L. : Cour des comptes, 201 p. Disponible sur : https://www.ccomptes.fr/system/files/2019-12/20191202-rapport-fraude-aux-prelevements-obligatoires.pdf (consulté le 14.04.2022).

DIRECTION GÉNÉRALE DES FINANCES PUBLIQUES, 2020. *La TVA à l'ère du digital en France* [en ligne]. Rapport de la Direction générale des Finances publiques. S. L. : ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance, ECOE202998X, 106 p. Disponible sur : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/277192.pdf (consulté le 14.04.2022).

PONIATOWSKI, Grzegorz, ŚMIETANKA, Adam et BONCH-OSMOLOVSKIY, Misha, 2020. *Study and Reports on the VAT Gap in the EU-28 Member States: 2020 Final Report*. Bruxelles : Commission européenne, Direction générale de la fiscalité et de l'union douanière, 100 p. CASE Research Paper n° 503.

Jean-Christophe SCHMITT

Élève ingénieur concours commun
Parcours Expertise économique
Master Analyse et politique économique (APE), École des Ponts ParisTech, EHESS, ENS, ENSAE, École polytechnique, HEC

Promotion 2020

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Paris School of Economics

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Carine STAROPOLI, chercheuse, professeure associée,
Paris School of Economics

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Carine STAROPOLI, chercheuse, professeure associée,
Paris School of Economics

Promouvoir l'intégration de l'énergie renouvelable au système électrique

Mots-clés : soutien aux énergies renouvelables, incitation, CfD

Contexte

Les énergies renouvelables sont largement encouragées par des mécanismes de soutien spécifiques en Europe. Cette thèse de master analyse les différents mécanismes de soutien aux technologies de l'électricité renouvelable du point de vue du risque et des distorsions, avec un accent particulier mis sur les contrats pour différence (CfD).

Missions et objectifs

L'objectif de ce travail est de proposer une amélioration du CfD actuel pour surmonter une distorsion mise en évidence dans l'article. Cette amélioration consiste en l'ajout d'un facteur correctif pour favoriser les projets favorables au système électrique. Les conséquences de ce nouveau mécanisme du point de vue du risque sont également analysées.

Résumé

Cette thèse de master analyse les différents mécanismes de soutien aux technologies de l'électricité renouvelable du point de vue du risque et de la distorsion, avec un accent particulier mis sur les contrats de différence (CfD). Un modèle stylisé est développé pour mettre en évidence une distorsion en faveur de la quantité par rapport à la valeur pour le système de l'électricité produite sous CfD. Nous constatons que les conceptions favorables au système des projets soutenus ne sont pas suffisamment encouragées par rapport à l'optimum. Ensuite, l'article met en lumière certains exemples problématiques dans lesquels cette distorsion nuit à l'efficacité du déploiement des technologies de l'électricité renouvelable, comme l'angle d'inclinaison et l'orientation des panneaux photovoltaïques. Enfin, une amélioration du CfD actuel est proposée pour surmonter cette distorsion. Elle consiste à ajouter un facteur correctif pour récompenser les projets favorables au système. En outre, les conséquences de ce nouveau mécanisme du point de vue du risque sont également analysées. Si le modèle d'évaluation des actifs financiers s'applique, nous avons constaté qu'une transition du CfD vers un CfD ajusté ne devrait pas augmenter le coût du capital.

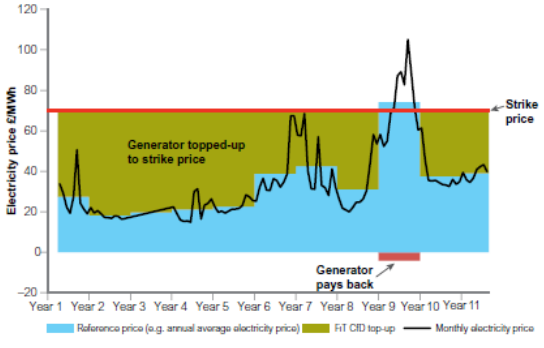


Illustration d'un contrat pour différence © Department of Energy and Climate Change, 2011. *Planning our electric future: a White Paper for secure, affordable and low-carbon electricity*. p. 38. Open Government Licence (source : gouv.uk).

Promoting a system-friendly integration of renewable power

Keywords: RES support mechanism, market design, CfD, electricity

Context

Renewable energies are widely promoted through specific support mechanisms in Europe. This Master thesis analyses different support mechanisms for RES-E technologies from a risk and a distortion perspective with a particular focus on Contracts for Difference (CfD).

Missions and goals

The objective of the paper is to propose an improvement of current CfDs to overcome a distortion highlighted in the paper. This improvement consists in the addition of a corrective factor to reward system-friendly projects. The consequences of this new mechanism from a risk perspective are also analysed.

Abstract

This Master thesis analyses different support mechanisms for RES-E technologies from a risk and a distortion perspective with a particular focus on Contracts for Difference (CfD). A stylised model is developed to point out a distortion in favor of quantity against value for the system of the electricity produced under CfDs. We find that system-friendly designs of supported projects are not promoted sufficiently to reach the optimum. Then, the paper highlights some problematic examples in which this distortion harms the efficiency of RES-E technologies deployment, such as in the tilt angle and orientation of photovoltaic panels. Finally, an improvement of current CfDs is proposed to overcome this distortion. This improvement consists of the addition of a corrective factor to reward system-friendly projects. Moreover, the consequences of this new mechanism from a risk perspective are also analysed. If the Capital Asset Pricing Model is applied, we find that a transition from CfDs to adjusted CfDs should not increase the cost of capital.

Énergie renouvelable © Seagul, 2017, CC0 (source : Pixabay).

Ville, environnement, transport

City, Environment, Transportation

Le département VET vise à former des ingénieurs de très haut niveau qui concevront, aménageront, exploiteront des villes et des territoires de demain, pour répondre aux grands objectifs sociétaux en respectant durablement les contraintes physiques de la planète.

Enjeux

Il est aujourd'hui largement admis que les villes, dans lesquelles vit plus de la moitié de la population mondiale, sont à la fois à l'origine des crises socio-écologiques que nous connaissons, et concentrent également leurs solutions.

Face à cette situation, l'époque actuelle requiert une nouvelle génération d'ingénieurs, ayant compris l'origine des problèmes et capables de tracer de nouvelles trajectoires tenant compte de la finitude des ressources et de leur acceptabilité sociale. Des ingénieurs qui soient également l'interface entre la science et la société, pour concevoir et accompagner des changements rapides, massifs, collectifs et individuels.

Formation

Pour cela, les enseignements du département comportent un tronc commun avec :

- des connaissances scientifiques sur la constitution et le fonctionnement des villes et des territoires, et leur impact sur l'environnement,
- une boite à outils mathématiques et informatiques pour analyser et modéliser aux plans technique, économique et sociétal des transitions vers une société soutenable.

À partir de ce socle de connaissances communes, les élèves approfondissent leurs connaissances selon un des trois parcours suivants (pouvant être croisé avec des enseignements du département GCC) :

- Ville : pour planifier et mettre en œuvre des transformations urbaines ambitieuses et soutenables, dans un contexte de non artificialisation des sols,
- Environnement : pour gérer les enjeux liés à l'eau, l'air, et l'énergie,
- Transport : pour identifier les besoins de mobilité, définir et mettre en œuvre des stratégies au service de villes et territoires à la fois sobres et vivants.

Tous les parcours donnent une large place aux projets collectifs et concrets, au travers de partenariats avec des acteurs de référence de la transition. Les élèves sont ainsi amenés à conduire, durant leur parcours, des travaux venant éclairer ou accélérer les décisions stratégiques d'aujourd'hui.

Métiers

Le département VET a pour vocation de former des ingénieurs qui rejoindront des entreprises de construction et de rénovation (ingénieur grands projets), des aménageurs (chef de projets urbains), des ingénieries (ingénieur transport, environnement), des cabinets de conseil (consultant en stratégies territoriales), des exploitants (responsable développement, maintenance et gestion de réseaux urbains), des financeurs (responsable analyse, contractualisation, suivi-évaluation de projets urbains et territoriaux).

Écoquartier Parc Marianne à Montpellier
© Arnaud Bouissou (source :Terra).

François-Laurent Touzain
Président
Department Head

Cécilia Cruz
Responsable académique
Academic Head

Lucile Gindre
Inspectrice des études
Academic Advisor

Catherine-Ange Noor
Assistante polyvalente
Department Assistant

The VET department aims to train high-level engineers to design, develop, and operate the cities and territories of tomorrow, in order to meet major societal objectives while respecting, in a sustainable approach, the planet's physical constraints.

Challenges

It is now widely recognized that cities, in which more than half of the world's population lives, are both the source of the socio-ecological crises we are experiencing, and also the focus of solutions, through transportation, construction and management of buildings, industry, land use, energy production, water and waste management.

Faced with this situation, the current era requires a new generation of engineers who understand the origin of the problems and are capable of tracing new trajectories that take into account the finitude of resources and their social acceptability. Engineers who are also the interface between science and society, to accompany rapid, massive, collective and individual changes.

Training

To this end, the department's courses include a common core with:

- *scientific knowledge on the constitution and functioning of cities and territories, and their impact on the environment,*
- *a toolbox of technical, economic and societal modeling that allows students to establish the formulas for transitions towards a sustainable society.*

And allow students to focus on their specialization:

- *Transportation: to identify mobility needs, define and implement strategies for cities and territories that are both sober and vibrant,*
- *City: to plan and implement ambitious and sustainable urban transformations, in a context of non-artificialization of soils,*
- *Environment: to manage issues related to water, air, and energy.*

All of the courses emphasize the importance of collective and concrete projects, through partnerships with key players in environmental transition. Throughout their studies, students are thus encouraged to carry out work that will enlighten or accelerate today's strategic decisions.

Careers

The VET department is dedicated to training transition engineers for construction and renovation companies (major project engineers), urban planners (urban project managers), engineering firms (transport, environment, project management), consulting firms (territorial strategies), operators (development, maintenance and management of urban networks), and financiers (analysis, contracting, monitoring and evaluation of urban and territorial projects). The City, Environment, Transportation department trains engineers to design transport systems, develop territories and protect the environment through a systemic and integrated approach.

Rame de TGV Atlantique circulant en Eure-et-Loir
© Arnaud Bouissou (source : Terra).

Laboratoires et chaires
Laboratories and chairs

Laboratoires • Laboratories

CEREA

Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
Thématiques : qualité de l'air, dispersion et transports de polluants, modélisation atmosphérique à l'échelle urbaine et régionale, assimilation de données.

Atmospheric Environment Education and Research Center
Themes: air quality, pollution dispersal and transportation, atmospheric modeling on an urban and regional scale, data assimilation.

CIRED

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
Thématiques : économie du développement et de l'environnement, questions énergie / déchets / transports / eau / alimentation, enjeux d'environnement global, principe de précaution, modélisation.

International Environment and Development Research Center
Themes: development and environmental economics, energy/waste/transportation/water/food issues, global environmental challenges, precautionary principle, modeling.

LATTS

Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés
Thématiques : sciences sociales, aménagement, histoire, dialogue entre sciences sociales et technique et ingénierie, dans les entreprises comme dans les administrations. Deux grands domaines abordés : organisations productives et organisations territoriales.

Technologies, Territories, and Societies Laboratory
Themes: social sciences, spatial planning, history, dialogue between social sciences and technology and engineering, in both private sector companies and the public sector. Two major domains tackled: productive organizations and territorial organizations.

LEESU

Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes urbains
Thématiques : milieu urbain et son environnement, analyse des territoires urbains et périurbains au travers de leur fonctionnement sociotechnique et environnemental en liaison avec les territoires ruraux avec lesquels ils sont en interaction.

Water, Environment, and Urban Systems Laboratory

LVMT

Laboratoire Ville, Mobilité, Transport
Thématiques : analyse et la modélisation des interactions entre transports et aménagement de l'espace.

City, Mobility, Transportation Laboratory
Themes: analysis and modeling of interactions between transportation and spatial planning.

Chaires • Chair

Chaire Éco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures • *The Eco-design of buildings and infrastructures Chair*

Cette chaire en partenariat avec Vinci aborde la durabilité des villes à travers les questions de la mobilité et des infrastructures de transport, des quartiers et des bâtiments, en étudiant leurs impacts environnementaux (analyse du cycle de vie), économiques et sociaux (évaluation socio-économique, évaluation holistique).

This chair in partnership with Vinci looks at urban sustainability through issues of mobility and transport infrastructure, city districts and buildings, studying their environmental impacts (life-cycle analysis), as well as economic and social impacts (socio-economic and holistic evaluations).

Les projets de fin d'études
Final year projects

Aménagement et urbanisme · *Regional and Urban Planning*

CHISE ARIMA | Les approches de plannings « à échelle humaine » des espaces urbains publics
"Human Scale" concepts and planning elements for public urban space

JULIETTE BERIOT O'CONNELL | L'évaluation de l'agriculture urbaine dans le cadre du renouvellement urbain
Urban agricultural assessment in urban renewal

PAUL GREDIGUI | Morphée : un outil centralisé de modélisation des nuisances chantier
Morphée: a centralized tool for modeling construction site nuisances

QUENTIN GUILLEMOT | Résilience des villes face aux changements systémiques : rôle et limites de l'innovation
Resilience of cities to systemic change: the role and limits of innovation

MARIE PUISTIENNE | L'insertion urbaine du Stade de France, de sa construction à nos jours
Urban integration of the Stade de France: from its construction to the present

HUGO THOMAS | La mobilité urbaine durable en Amérique Latine : étude de Bogotá et Lima
Sustainable mobility in Latin America: a study of Bogotá and Lima

Appels d'offres, financement de projets d'infrastructure · *Tenders, Infrastructure Project Finance*

NEUS MORCILO SALAS | Le refinancement des projets d'infrastructure
Refinancing of infrastructure projects

XIAOTONG ZHANG | Évaluation économique d'un projet photovoltaïque et éolien
Economic valuation of photovoltaic and wind projects

Environnement, développement durable · *Environment, Sustainable Development*

YU LI | Recherche sur la traitement biologique des urines visant à produire une solution nutritive
Study on the biological treatment of urine aiming at producing a nutrient solution

ANISSA WARDI | Pilotage d'un groupe de construction : l'intérêt d'une objectivation scientifique
Project management of a construction group: the interest of a scientific objectivization

CHANGTAO YANG | Mise en place des conditions normales d'utilisation dans l'analyse du cycle de vie (ACV) du bâtiment
Implementation of the normal conditions of use in building Life Cycle Assement

Gestion de l'eau · *Water Management*

THOMAS GIOVAGNOLI | Regards croisés autour de la GIRE en Afrique de l'Ouest
Crossed perspectives on IWRM in West Africa

YUNLU ZHAO | Méthodologies d'amélioration de performance de réseau de distribution d'eau potable
Implementation of Machine Learning strategies to improve the performance of WDNs

Transports et logistique · *Transportation and Logistics*

MATIAS BREGGIA | Restructuration d'un réseau bus : quels apports de la modélisation ? Le cas de Dakar
Restructuring of a bus network: what contribution can modeling make? The case of Dakar

RAFAEL HENRIQUE CARNEIRO TAVARES | Choix discrets : s'adapter à la problématique tout en gardant la fiabilité des résultats
Discrete choices: adapting to the problem while maintaining the reliability of the results

AKIHIRO IIDA | Évaluation des risques des réseaux routiers à capacité dégradée pendant la restauration
Risk evaluation of capacity-degraded road networks during the restoration period

FÉLIX MOAL | Concilier transition écologique de la mobilité et cohésion sociale à l'échelle des CA
Reconciling an eco-friendly shift of mobility and social cohesion at the local scale

ENGUERRAND PRIÉ | Les nouveaux instruments de l'action publique : modéliser pour évaluer et décarboner
New instruments for public action: modelization to evaluate and decarbonize

SHUN TAMURA | Méthodes d'analyse chronologique des chaussées mesurées avec les smartphones
Chronological analysis methods of roads measured with smartphones

LOU VALIDE | Développement des mobilités durables en Martinique
Development of sustainable mobility in Martinique

YUKI YAMASHITA | La gestion du stationnement à l'époque de véhicules autonomes partagés
Parking management in the era of shared autonomous vehicles

JINGYU ZHANG | Étude des impacts sur la circulation des principaux chantiers monégasques
Impacts of principal construction sites on circulation in Monaco

Chise ARIMA

Élève ingénieure double diplôme
Tokyo Institute of Technology, Japon

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Tokyo Institute of Technology

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Naoko SAIO, Associate Professor

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Alain L'HOSTIS, directeur de recherche HDR, université Gustave Eiffel

École des Ponts ParisTech

Les approches de plannings « à échelle humaine » des espaces urbains publics

Mots-clés : urbanisme, échelle humaine, planning urbain

Contexte

Formées au long de la croissance économique extrême et l'importation de la planification occidentale, les villes japonaises continuent de s'orienter vers la succession de réaménagement urbain à grande échelle, malgré aujourd'hui confrontées au vieillissement démographique sévère et au rétrécissement urbain anticipé. Alors que « l'échelle humaine (human scale) » est médiatisé par les secteurs public et privé, la tendance vers la réduction de l'environnement piétonnier et vers l'introduction des constructions surdimensionnées est persistante dans les projets.

Missions et objectifs

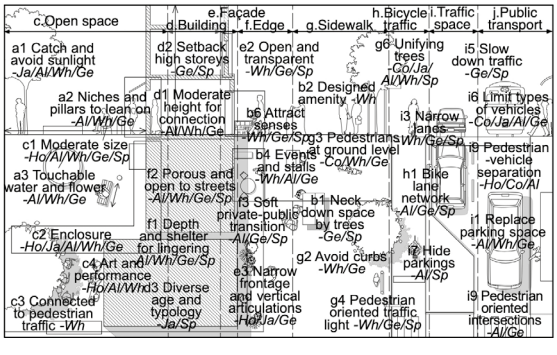
L'objectif de cette étude est d'acquérir une compréhension directe et globale des espaces urbains « à échelle humaine ». En étudiant directement les 15 théories urbaines d'influence internationale depuis l'époque moderniste, cette recherche analysera (1) la transition des tendances de l'urbanisme, (2) la définition d'un environnement urbain à « échelle humaine » et (3) les approches de planification dédié à la création d'un espace urbain « à échelle humaine ».

Résumé

Le chapitre 2 analysera le soutien et la négation actifs vers des théories précédentes. Les tendances des théories urbaines ont été classifiées en trois époques.

Le chapitre 3 expliquera les intentions et l'évolution des points de vue et des problématiques derrière l'utilisation du mot « l'échelle humaine » et récapitule sa définition. Les théories ont tendance à réclamer leur validité et leur applicabilité universelle en associant leurs principes à l'humanité. Les théories appellent au changement et s'écartent des valeurs urbaines existantes, faisant ainsi référence à la « nature humaine ». Les sens de « l'échelle humaine » examinées étaient (1) l'échelle de prise de décision et d'organisations sociales, (2) la conformité au taille, aux sensations et à la perception du corps humain, (3) la prioritisation de l'humain sur les automobiles, (4) l'intimité personnelle créée par les petits usages serrés, et (5) le caractère d'une espace qui incite des activités urbaines.

Le chapitre 4 examinera les éléments mentionnés pour la réalisation de « l'échelle humaine » de l'espace urbain. Les conditions de planning proposées comprennent (1) des éléments sensuels qui soutiennent le mouvement et le confort sensoriel à marcher et à rester, (2) des éléments structurels dédiés à la conception d'une partie spécifiques de l'espace urbain, (3) des éléments de circulation de vélos, de véhicule de transport en commun, et (4) les éléments de quartiers déterminant la conception des blocs et des usages.



Éléments d'un espace urbain « à échelle humaine » © Chise Arima, 2021.

"Human Scale" concepts and planning elements for public urban space

Keywords: human scale, urban theory, urban planning, definition, design guideline

Context

In the attempt to establish a benchmark for updating and reconstructing urban spaces in Japanese cities, expressions such as "human-scale planning" or "human development" are currently in frequent use. However, the content of urban theories is often cited ambiguously owing to partial interpretation and repetitive citation, and terms such as "human-scale" tend to be superficial.

Missions and goals

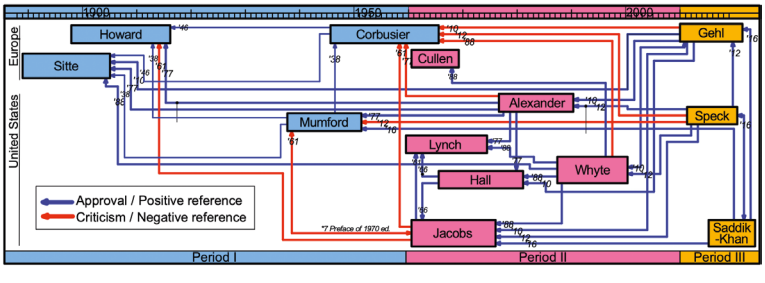
The purpose of this study is to gain a direct and holistic understanding of "human-scale" urban spaces. By directly studying the 15 globally influential urban theories since the start of the Modernist era, this research analyses (1) the transition of urbanism trends, (2) the definition of a "human-scale" urban environment, and (3) the planning approaches dedicated to the creation of a "human-scale" urban space.

Abstract

Chapter 2 examines the lively support and rebuttal for the relevant theories. Urban theory trends were classified in three periods: the establishment of universal urban theory (Period I), the call for the transition to an observation-based perspective (Period II), and the spread of human-oriented planning and accumulation of relevant practices (Period III).

Chapter 3 examines the evolution of viewpoints and problematics related to the use of the "human scale" concept and concludes with the definitions of "human scale". Theories tend to claim their legitimacy and universality by associating their principles with "humanity". They call for change and a departure from existing urban values, referring to "human nature". The implications of "human scale" examined are (1) the scale of decision-making and social organizations, (2) the notion of human body size, senses, and perception, (3) the priority of humans over automobiles, (4) the personal immediacy created by the density of small uses, and (5) the activity-encouraging feature of space.

Chapter 4 examines the planning elements mentioned for the realization of the "human scale" in urban space. The proposed "human scale" planning conditions involve (1) sensual elements that designate the motion and sensory comfort of walking and standing, (2) structural elements concerning the design of specific portions of urban space, (3) traffic elements associated with bicycle, automobile, and public transport, and (4) local elements suggesting the design of blocks and usages.



Des citations et des critiques des théories précédentes © Chise Arima, 2021.

Juliette BERIOT O'CONNELL

Formation complémentaire intégrée
Parcours Aménagement

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Agence nationale pour la rénovation urbaine

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Kim CHIUSANO, responsable du Pôle Innovation et Ville durable

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Erica DORR, doctorante, Agro ParisTech

L'évaluation de l'agriculture urbaine dans le cadre du renouvellement urbain

Mots-clés : agriculture urbaine, évaluation d'impact, renouvellement urbain, Quartiers Fertiles

Contexte

En 2020, l'ANRU a lancé l'appel à projets Les Quartiers Fertiles. Il vise à développer des projets d'agriculture urbaine dans les quartiers prioritaires de la politique de la ville. Pendant mon projet de fin d'études, j'ai été intégrée à l'équipe gérant cet appel à projets, comptant une centaine de lauréats.

Missions et objectifs

Ma mission était de poser les bases de l'évaluation de Quartiers Fertiles. L'objectif de cette démarche était de sélectionner des indicateurs de suivi permettant d'estimer l'impact de l'appel à projets.

Résumé

L'objectif de ce projet de fin d'études était d'établir une méthode d'évaluation des impacts de l'appel à projets. Les Quartiers Fertiles s'adressent à des projets d'agriculture urbaine développés dans les quartiers prioritaires de la politique de la ville.

Pour cela, j'ai choisi des indicateurs permettant d'évaluer l'impact individuel des projets qui ont ensuite été généralisés à l'ensemble de Quartiers Fertiles, ainsi que des indicateurs complémentaires. Je les ai obtenus en recensant, analysant et sélectionnant des indicateurs de suivi issus des dossiers de candidature des lauréats, en utilisant des critères de choix liés aux besoins spécifiques de cette mission.

J'ai abouti à la sélection de 12 indicateurs communs à l'évaluation des 98 lauréats, dont 11 que j'ai adaptés à l'évaluation de l'impact de l'appel à projets, et de 17 indicateurs complémentaires permettant de refléter la diversité des lauréats.

Ce travail doit encore être approfondi et enrichi grâce à d'autres travaux. Il doit, notamment, être complété par des indicateurs qualitatifs.

Socle commun (échelle locale)	
Intégration du projet au territoire et transformation du quartier	Nombre de partenariats noués avec des acteurs du territoire
	Intégration au PAT
	Surface dédiée à de la production pure
Bénéfices économiques et sociaux pour les habitants des QPV et l'économie locale	Nombre d'ETP en insertion
	Nombre d'ETP hors insertion
	Chiffres d'affaires
	Taux de participation / remplissage des activités
Santé des habitants	Volume de production
	Volume de production dédié aux habitants
	Nombre de foyers bénéficiaires de la distribution alimentaire
Réponse aux enjeux environnementaux et climatiques	Surface désartificialisée au cours du projet
	Volume d'eau de pluie récupéré

Grille finale d'évaluation - Socle commun à l'ensemble des projets, déclinaison locale © Juliette Beriot O'Connell, 2021.

Urban agricultural assessment in urban renewal

Keywords: urban agriculture, impact assessment, urban renewal, Quartiers Fertiles

Context

In 2020, the ANRU launched a call for projects named "Les Quartiers Fertiles". Its purpose was to increase the number of urban agriculture projects in neighborhoods undergoing urban renewal. During my internship, I was a part of the team overseeing this call for projects, which now has around a hundred laureate projects.

Missions and goals

I was to establish the basis of the assessment of Quartiers Fertiles. The objective was to choose reporting indicators in order to assess the impact of the call for projects. I also helped the team to select the laureates of the third session of Quartiers Fertiles.

Abstract

My aim with this project was to create a method tailored to assess the impact of the call for projects "Les Quartiers Fertiles", the goal of which is to fund urban agriculture projects in impoverished neighbourhoods.

I chose indicators to assess both the individual impact of the winning projects and the global impact of Quartiers Fertiles, as well as complementary indicators. I selected these from among the indicators suggested by the laureates in their initial applications, using criteria adapted to the specific contest.

I obtained a common basis for individual assessment containing 12 indicators, 11 of which are used to assess the global impact of Quartiers Fertiles. I also chose 17 complementary indicators which serve other purposes, among which are the representation of the diversity of the laureates.

This work should still be developed further, in particular by choosing qualitative indicators to complement the mostly quantitative ones chosen here and by making comparisons with other studies.

Echelle nationale	
Intégration du projet au territoire et transformation du quartier	Nombre de projets intégrés à un PAT
	Surface dédiée à de la production pure
Bénéfices économiques et sociaux pour les habitants des QPV et l'économie locale	Nombre d'ETP en insertion
	Nombre d'ETP hors insertion
	Chiffres d'affaires moyen des projets
	Taux de participation / remplissage moyen des activités
Santé des habitants	Volume de production moyen par projet et par an
	Part moyenne du volume de production dédiée aux habitants
	Nombre total de foyers bénéficiaires de la distribution alimentaire
Réponse aux enjeux environnementaux et climatiques	Surface totale désartificialisée au cours du projet
	Volume total d'eau de pluie récupérée par les lauréats
Autres	Evaluation des projets en les regroupant par territoire
	Evaluation des projets en les regroupant par type

Grille finale d'évaluation, déclinaison nationale
© Juliette Beriot O'Connell, 2021.

Éléments de bibliographie

AGENCE NATIONALE POUR LA RÉNOVATION URBAINE (ANRU), 2020. *Les quartiers fertiles. L'agriculture urbaine dans nos quartiers. Cahier des charges de l'appel à projets* [en ligne], Paris : ANRU, 40 p. Disponible sur : https://www.anru.fr/sites/default/files/media/downloads/anru_aapau_cahierdescharges_2020011.pdf (consulté le 12.01.2022).

CLERINO, Paola et FARGUE-LELIÈVRE, Agnès, 2020. Formalizing objectives and criteria for urban agriculture sustainability with a participatory approach. *Sustainability* [en ligne], septembre 2020, vol. 12, n° 18, 7503. DOI: 10.3390/su12187503.

LAIREZ, Juliette, FESCHET, Pauline, AUBIN, Joël *et al.*, 2016. *Agriculture et développement durable : Guide pour l'évaluation multicritère*. Dijon : Educagri éditions.

Paul GREDIGUI

Formation complémentaire intégrée pour les normaliens civils
ENS Paris-Saclay

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Artelia

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Louis Henry DESPAIGNE, responsable de la cellule Offre grands projets, branche Stratégie et Management des territoires

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Alexis POULHÈS, chercheur, LVMT, école des Ponts ParisTech

Morphée : un outil centralisé de modélisation des nuisances chantier

Mots-clés : nuisances, chantier, modélisation, diagnostic socio-économique, sensibilité du territoire

Contexte

Ce projet de fin d'études (PFE) trouve son origine dans un constat fait par Artelia : il est difficile de quantifier, en amont, les différentes nuisances associées au chantier, alors que cette question gagne en importance depuis plusieurs années. Cette donnée est centrale pour les maîtres d'ouvrage et les aide à prendre des décisions éclairées. À l'heure actuelle, il n'existe pas d'outil centralisé pour mesurer ces nuisances.

Missions et objectifs

Ce PFE visait donc à construire un outil centralisé pour modéliser les nuisances chantiers, et pouvant être utilisé par des maîtres d'ouvrage. L'outil développé, Morphée, est une donc une preuve de concept qui pourra ensuite être déployé de manière opérationnelle.

Résumé

Cet outil a pour objectif de quantifier, de manière rapide, les nuisances associées aux chantiers très en amont des projets. De fait, il permet d'engager la réflexion sur les nuisances dès la phase de création du projet et fournit des éléments quantitatifs pour aider les porteurs de projet dans leurs décisions.

Il se compose de plusieurs éléments. Premièrement, il réalise un diagnostic de sensibilité du territoire, c'est-à-dire, sa propension à être impacté par les nuisances. Trois thématiques sont étudiées pour cette analyse de sensibilité : la sensibilité environnementale prend en compte l'ensemble des zones protégées, la sensibilité humaine correspond à l'ensemble des activités humaines (densité bâtiments sensibles) et enfin la sensibilité face au milieu physique représente les risques associés au milieu naturel (risque sismique, hydrographie, *etc.*). Ensuite, les sources de nuisances sont estimées en fonction de la typologie de chantier. Ces résultats permettent alors d'alimenter les modèles simplifiés de trafic, de pollution sonore et de l'air intégrés à Morphée. Les résultats de ces différentes modélisations sont réutilisés au sein d'un outil de diagnostic socio-économique, ayant pour objectif de chiffrer les différents impacts, afin de les comparer et opter pour des décisions cohérentes en matière de réduction des impacts.

Les différents outils décrits ci-dessus ont pu être testés pour le chantier de la ZAC du Village Olympique et Paralympique à Saint-Denis. L'impact socio-économique total des nuisances a été estimé à 64 millions d'euros.

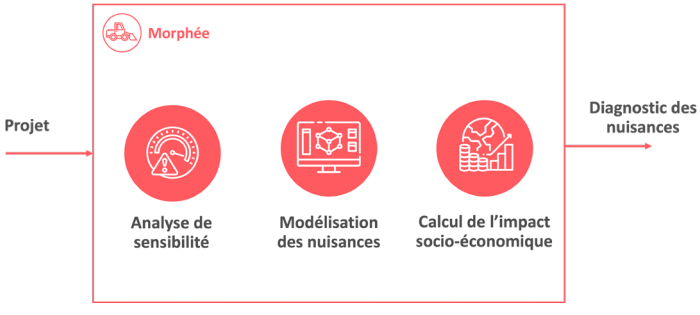


Schéma de Morphée © Paul Grédigui, 2021.

Morphée: a centralized tool for modeling construction site nuisances

Keywords: nuisances, construction site, modelling, sensitivity of the territory, socio-economic diagnostic

Context

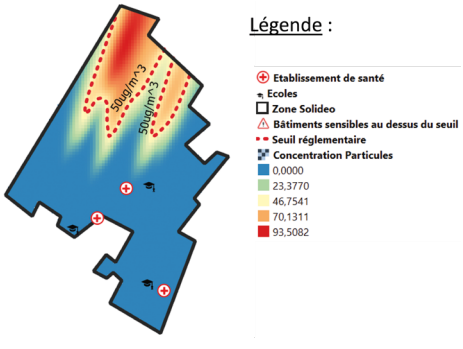
The origin of this PFE is an observation made by Artelia: it is difficult to quantify upstream the various nuisances associated with the building site. However, this subject has taken on more and more importance during the last years. Moreover, at present there is no centralized tool to model these nuisances.

Missions and goals

As there is no centralized tool to model construction site nuisances, the objective of this PFE is to build such a tool which will then be used by project owners. The tool developed ("Morphée") is a proof of concept that can then be deployed in an operational manner.

Abstract

The study describes Morphée, a centralised tool to analyse the nuisances induced by a building site. The tool aims to rapidly quantify the nuisances caused by the construction sites at an early stage, even before the construction begins. The objective is to anticipate and quantify the impacts of the nuisances on the environment and people to help the project manager make decisions. Morphée contains several elements which can be used together or individually depending on the need. First comes a diagnostic of a territory's sensitivity which represents its likelihood of being impacted by a nuisance. This analysis is divided into 3 subcategories: environmental sensitivity, taking into account environmentally protected areas; human sensitivity, measuring human activities and infrastructures; and finally, physical environment sensitivity, which measures the risks induced by nature (seismic risk, hydrography, etc.). Another tool contained in Morphée helps to predict the sources of nuisances depending on the properties of the building site. The results can then be fed into the simplified models used to measure the intensity of each nuisance modelled in Morphée, namely traffic, air pollution, and noise. Finally, the socio-economic impacts of the nuisances are quantified and monetised, which helps to compare them and make the appropriate decisions to reduce them. The elements described above were tested on the "ZAC du Village Olympique et Paralympique" project in Saint-Denis, with the total socio-economic impact of the nuisances estimated at 64 million euros.



Modélisation de la pollution de l'air avec Morphée : concentration en PM10 dans la ZAC Village Olympique
© Paul Grédigui, 2021.

Éléments de bibliographie

DOUILLET, Maia, SIPOS, Gala, DELUGIN, Léna *et al.*, 2021. *Le coût social du bruit en France. Estimation du coût social du bruit en France et analyse de mesures d'évitement simultané du coût social du bruit et de la pollution de l'air*. S. L. : ADEME.

HANKACH, Pierre, CHACHOUA, Mohamed, MARTIN, Jean-Marc *et al.*, 2011. Describing a Decision Support System for Nuisance Management of Urban Building Sites. *Technology Systems and Management. Communications in Computer and Information Science*, vol. 145, pp. 312-320.

THILL, Marion et DE TONI, Arianna, 2017. *Qualité de l'air et émissions polluantes des chantiers du BTP. État des connaissances et mesures d'atténuation dans le bâtiment et les travaux publics en faveur de la qualité de l'air*. S. L. : ADEME, 142 p.

Quentin GUILLEMOT

Élève ingénieur concours commun

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
ChangeNOW

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Carolina MEZA, responsable programme des conférences et programme villes

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Marine LEGRAND, chercheuse, LEESU, école des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Résilience des villes face aux changements systémiques : rôle et limites de l'innovation

Mots-clés : résilience, innovation urbaine, risques, vulnérabilités, modèles urbains

Contexte

Ma mission, réalisée dans le cadre de l'organisation du sommet ChangeNOW, rencontre annuelle des acteurs des transitions sociale et environnementale, concernait, d'une part, l'organisation et l'édito des prises de parole sur scène et, d'autre part, l'organisation du programme des villes. Ces deux programmes portaient une attention particulière à la notion de résilience des villes et proposaient des solutions innovantes.

Missions et objectifs

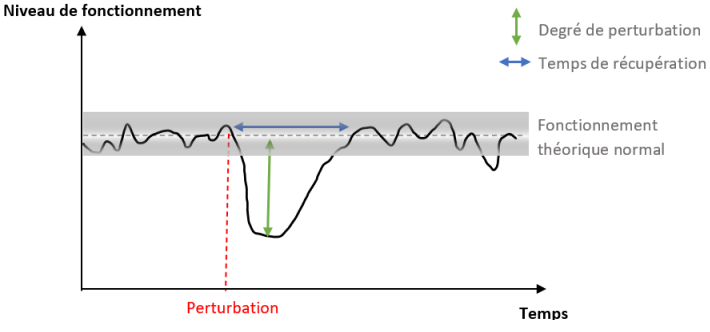
Ce travail vise à questionner le rôle de l'innovation dans la résilience urbaine, concept aujourd'hui central des politiques publiques et des démarches entrepreneuriales. Au-delà de l'étude du lien entre résilience et innovation, il s'agit aussi de comparer les différentes visions de la résilience urbaine.

Résumé

Face aux risques qui pèsent sur les villes et aux enjeux systémiques qui se multiplient et s'intensifient, la quête de résilience dans les espaces urbains apparaît nécessaire et peut sembler intimement liée au principe d'innovation. Ce dernier traduit l'apport de procédés nouveaux dans la gestion de la ville, bien qu'il s'accompagne d'obstacles qui lui sont intrinsèques, que ce soit dans la mise en place des innovations ou dans leur conception. Naît alors le besoin de penser la ville autrement, sous le prisme d'autres imaginaires, pour mieux laisser sa place à l'innovation urbaine et l'encourager.

La résilience, définie comme la capacité à résister et s'adapter à des crises et pressions sur le système, est cependant difficile à construire. Le manque de moyen pour la mesurer n'aide ni à la prise de décision ni à sa prise en considération, que ce soit au niveau des instances dirigeantes, des entreprises ou de la population. Se pose alors la question de la légitimité de ce concept, pourtant très populaire. Si la recherche de résilience aide, en effet, à adopter des méthodes nécessaires pour répondre aux enjeux actuels, il n'est pas souhaitable que l'objectif de résilience remplace les concepts de soutenabilité et d'écologie.

Quand bien même la recherche de résilience serait un objectif en soi, il conviendrait de questionner le rôle de l'innovation dans la construction, étant donné qu'elle n'est qu'un concept rhétorique et peut par conséquence être décevant.



Représentation graphique de la résilience d'un système face à une perturbation © Quentin Guillemot, 2022.

Resilience of cities to systemic change: the role and limits of innovation

Keywords: urban resilience, innovation, risks, vulnerabilities, urban model

Context

In the context of the ChangeNOW summit, an annual summit gathering the protagonists of social and environmental transition, my mission was focused on the construction of the stage program dealing with numerous engineering-related topics, and on the organization of the cities program. Those two programs zoomed in on the notion of urban resilience and proposed innovative solutions.

Missions and goals

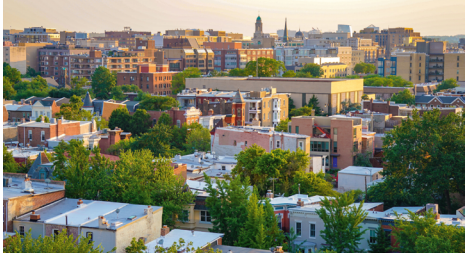
This work aims at analyzing the role of innovation in urban resilience, which is now a central concept in public policies and entrepreneurial approaches. Beyond the study of the link between resilience and innovation, the objective is also to compare different visions of urban resilience.

Abstract

Facing numerous risks and intensifying concerns, cities must build resilience programs that will allow them to resist and prevent future crises. Innovative solutions seem to be the answer, whether they concern simple technical objects or new processes in the way we think of cities. However, their implementation is encumbered by the existing ways of ruling, modifying, and living in the city. As a consequence, it may be necessary to imagine other city models that will stimulate innovation.

Resilience, the ability of a system to resist and adapt when facing systemic crisis, appears to be onerous to build. The lack of ways to measure it makes it even harder for decision makers to take bold steps in the direction of resilience. The concept therefore ought to be questioned. Overall, it seems counter-productive to focus on resilience rather than sustainability or ecology, even though some components of a resilience-seeking approach appear to be necessary to face today's issues.

If resilience were to be proven as an objective per se, the role of innovations in its building ought to be questioned as resilience is only a rhetorical concept that can fall short of its expectations.



Washington DC - Ville Biophilique © Ted Eytan, 2019, CC BY-SA 4.0 (source : Biophilic Cities).

Éléments de bibliographie

BIHOUIX, Philippe, 2014. *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*. Paris : Éditions du Seuil, 330 p.

FOREST, Joëlle et HAMDOUCH Abdelillah, 2015. *Quand l'innovation fait la ville durable* [en ligne], Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/290180775_Quand_l'innovation_fait_la_ville_durable (consulté le 18.10.2021).

HOPKINS, Rob, 2010. *Manuel de transition. De la dépendance au pétrole à la résilience locale*. Montréal : Écosociété, Escalquens, 212 p.

Marie PUISTIENNE

Élève ingénieure concours commun

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Consortium Stade de France

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Fabrice REIGNER, responsable du service Maîtrise d'ouvrage au Stade de France

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Éric ALONZO, enseignant, École d'architecture de la ville et des territoires de Paris-Est

École des Ponts ParisTech

L'insertion urbaine du Stade de France, de sa construction à nos jours

Mots-clés : aménagement du territoire, collectivités locales, insertion, bâtiment public

Contexte

Le Stade de France a été construit à l'occasion de la Coupe du Monde de Football de 1998. Le terrain sur lequel il a été installé était une ancienne friche industrielle, tout comme les terrains alentours. Sa construction a permis l'émergence d'un nouveau quartier, celui de la Plaine-Saint-Denis. Avec la contribution des collectivités locales, du Consortium Stade de France (l'entreprise gestionnaire du Stade de France), de l'État et des riverains, le Stade de France a pu devenir un facteur d'intégration sociale, professionnelle, urbaine et économique.

Missions et objectifs

Consortium Stade de France (CSDF) est l'entreprise chargée de la gestion du Stade de France jusqu'en 2025, dont l'État est propriétaire. Ce projet de fin d'études (PFE) a été réalisé au sein du service de maîtrise d'ouvrage, chargé de la modernisation du Stade de France en vue des Jeux Olympiques. La participation aux travaux d'aménagement du Stade m'a permis de comprendre l'impact présent et futur du Stade sur son environnement.

Résumé

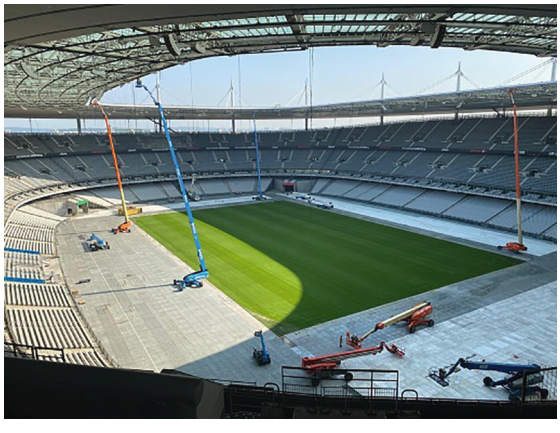
À sa construction en 1998, l'État souhaitait doter le pays d'un stade de grande ampleur, en capacité d'accueillir un événement de portée internationale.

Cependant, le Stade de France est plus qu'une publicité de la France à l'étranger. Il a été installé dans l'un des départements les plus pauvres de France, la Seine-Saint-Denis.

De nos jours, aux abords du Stade de France, s'est développé tout un quartier. La friche industrielle a disparu, des commerces, logements, restaurants, transports en commun (stations de RER et de métro) s'y sont implantés.

Ce rapport cherche à comprendre dans quelle mesure le Stade de France a eu un impact et a transformé son environnement et comment il a été un facteur d'insertion urbaine, notamment, en termes d'insertion professionnelle, de développement urbain, d'insertion sociale et de protection de l'environnement.

Pour mener cette réflexion, une étude chronologique a été réalisée, puis l'impact contemporain du Stade de France a été analysé, avant d'envisager son impact futur, notamment, avec l'accueil des Jeux Olympiques en Seine-Saint-Denis. En parallèle, une étude auprès des différents acteurs impliqués – l'État, le CSDF, les collectivités territoriales – a été menée.



Arène du Stade de France – Travaux de modernisation, été 2021
© Marie Puistienne, 2021.

Urban integration of the Stade de France: from its construction to the present

Keywords: urbanism, local authority, integration, public building

Context

The Stade de France was built for the 1998 Football World Cup. The land on which it was built and that surrounds it was an old industrial wasteland. The construction allowed the emergence of a new district, Plaine-Saint-Denis. With the contribution of local authorities, the Stade de France Consortium (the company managing the Stade de France), the State, and local residents, the Stade de France has become a factor of social, professional, urban, and economic integration.

Missions and goals

This study was carried out at the Stade de France Consortium (CSDF), the company responsible for the management of the Stade de France until 2025, the state being the owner of the stadium. More specifically, the PFE was carried out at the project management department, in charge of the modernization of the Stade de France for the Olympic Games. Participating in the development of the stadium allowed me to understand the present and future impact of the stadium on its environment.

Abstract

The Stade de France was built to host the Football World Cup in 1998 in France, when the state demanded the construction of a large stadium for an event of international scale. However, the Stade de France is more than an international advertisement for France. It was built in one of the poorest departments of France, Seine-Saint-Denis.

Nowadays, a real neighborhood with its own life has developed around the Stade de France. The industrial wasteland has disappeared, and shops, housing, restaurants, and public transport (RER and metro stations) have established themselves.

This report seeks to understand to what extent the Stade de France has had an impact and has transformed its environment, and how the Stade de France has been a factor of urban integration, particularly in terms of occupational integration, urban development, social integration, and environmental protection.

To conduct this analysis, a chronological study was carried out starting with the construction of the Stade de France, continuing with an analysis of its impact today, and concluding with an outlook on the future impact the Stade de France could have, notably with the upcoming Olympic Games. In parallel, a study of the various actors involved – the state, the CSDF, local authorities – was conducted.

Quartier développé autour du Stade de France suite à sa construction © PhotoLondonUK, 2019, Asset Assurance™ (source : Shutterstock).

Hugo THOMAS

Élève ingénieur concours commun
Master Transport et développement durable (TraDD), École des Ponts ParisTech, Mines ParisTech, École polytechnique

Promotion 2021

Début de doctorat réalisée à :
Université Rennes 2 - Laboratoire ESO

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Vincent GOUËSET et Florent DEMORAES, enseignant-chercheur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Émeric FORTIN, directeur académique, Master Transport et développement durable (TraDD), École des Ponts ParisTech

La mobilité urbaine durable en Amérique Latine : étude de Bogotá et Lima

Mots-clés : mobilité durable, Amérique Latine, politiques publiques, planification urbaine, transport urbain

Contexte

Le programme de recherche Modural porte sur « Les pratiques de la mobilité durable dans les métropoles d'Amérique Latine : étude comparée de Bogotá (Colombie) et Lima (Pérou) ». Il étudie la mobilité durable du point de vue des pratiques et se concentre sur les périphéries populaires des deux villes d'étude. Il est constitué d'une équipe pluridisciplinaire internationale répartie entre la France, la Colombie et le Pérou.

Missions et objectifs

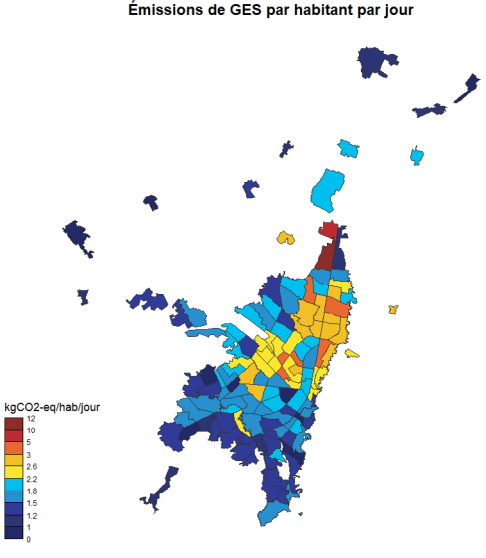
Ce projet de fin d'études (PFE) visait à produire et synthétiser des connaissances sur la mobilité durable. Les attendus du stage portaient principalement sur trois volets :

- La caractérisation des politiques de transport urbain à Lima et Bogotá ;
- « L'efficacité environnementale » des modes de transport dans les villes du sud ;
- La cartographie dynamique des pulsations urbaines.

Les livrables consistaient en un rapport en espagnol sur les volets 1 et 2, un recensement des modes de transport disponibles à Bogotá et Lima, la retranscription des entretiens réalisés, le code R contenant les traitements pour le volet 3, une animation au format gif/mp4 des pulsations urbaines de Bogotá.

Résumé

La mobilité durable est un paradigme omniprésent dans les discours politiques. Pourtant, sa définition n'est pas évidente et son évaluation relève de nombreux enjeux méthodologiques. Dans le contexte particulier de l'Amérique Latine, il n'est pas certain que ce concept issu des Pays du Nord s'entende de la même façon qu'en Europe. Bogotá et Lima comptent 10 millions d'habitants chacune. Leurs caractéristiques à première vue font état d'un étalement urbain important et d'une forte ségrégation socio-résidentielle fonctionnant comme une « centrifugeuse sociale », reléguant les ménages les plus pauvres, souvent jeunes, en périphérie. La question de la durabilité des mobilités dans ces villes et ce contexte particulier revêt donc une dimension sociale de premier plan. À partir d'une étude comparée de Bogotá et Lima, ce PFE propose un diagnostic de la durabilité de la mobilité dans les villes d'Amérique Latine. Le rôle des politiques publiques dans la planification urbaine, les modalités de réforme des transports, l'importance du transport informel dans les périphéries populaires et les enjeux du changement climatique y sont analysés à l'aune d'indicateurs permettant une comparaison synthétique.



Émissions de gaz à effet de serre (GES) par habitant liées au transport en fonction de la zone de résidence, Bogotá, Colombie
© Hugo Thomas, 2022.

Sustainable mobility in Latin America: a study of Bogotá and Lima

Keywords: sustainable mobility, Latin America, public policies, urban planning, urban transport

Context

The research programme "Modural" studies mobility practices in Latin America's cities. It compares Bogotá and Lima and studies sustainable mobility from the users' point of view, focusing on working-class suburbs. It is conducted by a pluridisciplinary international team located across France, Colombia, and Peru.

Missions and goals

The PFE seeks to build and summarize knowledge about sustainable mobility. The internship focused on the following three axes:

- *The characterization of urban public transport policies in Lima and Bogotá.*
- *The "environmental efficiency" of transport modes in cities of the global South.*
- *A dynamic mapping of urban pulses.*

The deliverables were a 100-page report in Spanish on axes 1 and 2, a list of transport modes in Bogotá and Lima, a script of the interviews carried out, an R script for axis 3, and an animated gif/mp4 of the urban pulses in Bogotá.

Abstract

Sustainable mobility is an ubiquous paradigm in political agendas. However, it is not easy to define and its evaluation entails a number of methodology issues. In the specific context of Latin America, it is not so clear wether this concept coming from the global North is understood in the same way as in Europe. Bogotá and Lima are cities of 10 million inhabitants. At first sight, their main features are a huge urban sprawl and a strong socio-residential segregation which acts as a "social centrifuge", sending poor and often young households out to the suburbs. Sustainable mobility in these towns therefore has a strong social scope. On the basis of a comparative study on Bogotá and Lima, this PFE carries out a diagnostic of the sustainability of mobility in Latin American cities. It analyzes the role of public policies in urban planning, the modalities of transport reforms, the importance of paratransit in working-class suburbs, and the stakes of climate change, using indicators allowing a synhtetic comparison.

Usagers du métro de Lima, Pérou © Hugo Thomas, 2022.

Éléments de bibliographie

BEDOYA, V., MARQUET, O. et MIRALLES-GUASCH, C., 2016. Estimación de las emisiones de CO_2 desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín. *Revista Transporte y Territorio*, vol. 15, pp. 302-322.

BOCAREJO, J.-P.et URREGO, L. F., 2020). The impacts of formalization and integration of public transport in social equity : The case of Bogota. *Research in Transportation Business & Management*, 100560. DOI: 10.1016/j.rtbm.2020.100560.

JAUREGUI-FUNG, F., KENWORTHY, J., ALMAAROUFI, S. *et al.*, 2019. Anatomy of an Informal Transit City : Mobility Analysis of the Metropolitan Area of Lima. *Urban Science*, vol. 3, n° 3, p. 67. DOI: 10.3390/urbansci3030067.

Neus MORCILO SALAS

Élève ingénieure double diplôme
Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne
Mastère Spécialisé® Financement de Projets, École des Ponts ParisTech

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
ESTER

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Thami EL ALAMI, consultant

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Antoine ARDUIN, enseignant, DIF Capital Partners

Le refinancement des projets d'infrastructure

Mots-clés : refinancement, couverture de taux d'intérêt, financement de projet

Contexte

Le refinancement est une opération qui permet aux investisseurs des projets d'infrastructure de remplacer le contrat de crédit d'un financement en cours et de renégocier des conditions de financement plus avantageuses pour le projet. Il s'agit d'une stratégie fréquemment utilisée pour maximiser le rendement des actionnaires en cours de vie du projet.

Missions et objectifs

Ce projet a pour objectif de valoriser l'opportunité du refinancement du point de vue des investisseurs à partir de l'analyse des avantages et des coûts que la restructuration du financement représente pendant la vie du projet et, en particulier, concernant les enjeux liés au risque de taux d'intérêt.

Résumé

Les projets d'infrastructure présentent des caractéristiques de financement très particulières. Il s'agit de financements complexes qui intègrent plusieurs sources financières, pouvant être de longue durée et qui impliquent souvent un grand nombre d'acteurs. Le refinancement, entendu comme le remboursement anticipé total de la dette et la levée subséquente d'une nouvelle dette à des conditions potentiellement plus avantageuses pour l'investisseur, peut présenter de grands avantages pour le projet, mais soulève également quantité d'enjeux. Quand il s'agit du refinancement d'une dette bancaire à taux variable, les enjeux liés au risque des taux d'intérêt sont majeurs.

Le projet vise à apporter des éléments permettant de valoriser l'opportunité de refinancer un projet d'infrastructure du point de vue des investisseurs et, notamment, vis-à-vis des problématiques liées à la couverture du risque de taux d'intérêt. L'analyse des opportunités et des coûts associés au refinancement et les différents positionnements stratégiques sont présentés. Les éléments qui définissent les cadres dans lesquels un refinancement peut apporter de la valeur ajoutée sont identifiés et les apprentissages sont finalement appliqués dans des cas d'étude permettant d'illustrer et consolider les conclusions tirées.

Refinancing of infrastructure projects

Keywords: refinancing, interest rate hedging, project finance

Context

Refinancing is a transaction that allows investors in infrastructure projects to replace the credit agreement of an existing financing and negotiate new financing terms for the project. This strategy is frequently used to maximise shareholder return during the life of the project.

Missions and goals

The aim of this project is to assess the option of refinancing from an investor's point of view by analysing the benefits and costs of restructuring the financing during the life of the project, with particular reference to interest rate risk issues.

Abstract

Infrastructure projects have very particular financing characteristics. They require huge investments to cover a medium- to long-term business plan and their financing structure is complex, involving a number of actors and different financing sources. Refinancing the debt facility may be an interesting strategy for investors, entailing full early repayment of the current debt facility and raising a new one, potentially providing better conditions for investors. However, the challenges involved may outweigh the economic interest. When it comes to the refinancing of debt facilities indexed on a variable interest rate, the interest rate risk is a major issue.

The purpose of this paper is to provide insights for assessing the potential of refinancing an infrastructure project from the investors' perspective. It particularly focuses on the challenges associated with the hedging of the interest rate risk. An analysis of the key costs and benefits of the refinancing is presented, leading to the definition of the frameworks that add value to tha project in economic terms while taking different investors' strategies into account. Finally, the conclusions of the analysis are tested on hand of case studies.

Xiaotong ZHANG

Élève ingénieure double diplôme
Parcours Eau et Environnement
Université de Tongji, Shanghai, Chine

Promotion 2019

Mission en entreprise réalisée à :
EOLFI

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Skander CHERIF, Analyst Financier

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Clive GALLERY, responsable de module, École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Évaluation économique d'un projet photovoltaïque et éolien

Mots-clés : photovoltaïque, éolien, financier

Contexte

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie photovoltaïque (PV) et l'énergie éolienne, sont des ressources naturelles à coût nul, qui peuvent permettre la décarbonisation, tout en facilitant l'allocation rationnelle des ressources mondiales. Le développement des projets d'énergie PV et éolienne comporte trois phases principales : le développement, la construction et l'exploitation. Les différentes phases impliquent différents niveaux d'investissement et profil de risque, et nécessitent donc différents critères d'évaluation pour analyser la faisabilité du projet. L'évaluation du potentiel d'investissement d'un projet PV et éolien se fait principalement du point de vue de la technologie, du rendement et du risque.

Missions et objectifs

Missions

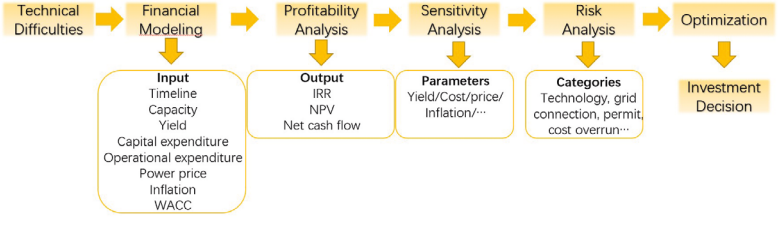
- Comment construire un modèle financier ?
- Quels sont les principaux risques liés à l'investissement des énergies renouvelables ?
- Comment prendre une décision d'investissement dans des projets photovoltaïque ou éolien ?

Objectifs

- Réaliser de manière indépendante des modélisations et des analyses financières
- Comprendre les caractéristiques des projets photovoltaïques et éoliens
- Comprendre comment développer un projet photovoltaïque et éolien

Résumé

Sous l'impulsion des objectifs mondiaux de réduction des émissions de carbone, la transition vers les énergies renouvelables est fermement engagée. L'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne ont connu une croissance rapide au cours des dernières décennies. Afin de déterminer la décision d'investissement des projets photovoltaïques et éoliens, cette étude analyse la faisabilité des projets, en termes de difficultés techniques, d'indicateurs financiers, de sensibilité et de risques spécifiques à chaque étape du développement, de la construction, de l'exploitation et du démantèlement du projet. L'énergie éolienne en mer n'en est qu'à ses débuts et l'accent est mis sur l'identification des sites afin de trouver des ressources éoliennes en mer de haute qualité, avec le LCOE (coût actualisé de l'énergie) comme mesure d'évaluation. Cet article résume la tendance future du photovoltaïque et de l'éolien, à savoir l'augmentation de la compétitivité du marché, la réduction des coûts et l'augmentation de l'efficacité de la production comme objectif de développement.



Research framework © Xiaotong ZHANG, 2021.

Economic valuation of photovoltaic and wind projects

Keywords: PV energy, wind energy, financial analysis

Context

Since the industrial revolution, the world's energy structure has been dominated by fossil fuels, but this resource-consuming and cheap energy has done irreversible damage to the environment and human health. In order to reduce CO_2 emissions, the energy structure is bound to embark on a transformation path. Renewable energy sources, such as photovoltaic (PV) and wind power, are zero-cost natural resources which can achieve decarbonization while facilitating the rational allocation of global resources. There are three main phases involved in the development of PV and wind energy projects: development, construction, and operation. The different phases involve different levels of investment and risk profiles, and thus require different assessment criteria to analyze the feasibility of each project. The economic valuation methodology for analyzing the feasibility of PV and wind projects is mainly based on financial models that combine the volume, range, and development concepts to estimate the project's range of value.

Missions and goals

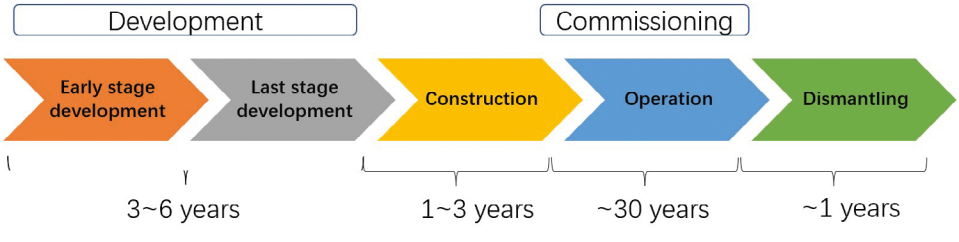
- *How to build a financial model.*
- *What are the main risks of investing in renewable energy.*
- *How to make an investment decision for photovoltaic or wind projects*

Objectives

- *Independent financial modelling and analysis.*
- *Understanding the characteristics of photovoltaic and wind projects.*
- *Understanding how to develop a PV and wind project.*

Abstract

Driven by global low-carbon goals, the transition to renewable energy is firmly underway. Photovoltaic and wind power have grown rapidly in the past decades. In order to determine investment decisions on PV and onshore wind projects, this study evaluates the economic feasibility of the projects in terms of technical difficulties, financial indicators, and sensitivities and specific risks at each stage of project development, construction, operation, and decommission. Offshore wind power is still at an early stage of development, and the current focus is on site identification aiming to locate high-quality offshore wind resources, with LCOE (Levelized cost of energy) as the assessment metric. The paper concludes by summarizing the future trends of PV and wind power, with an increase in market competitiveness, a reduction of costs, and an increase in production efficiency as the development goals.



Development stage of renewable energy project © Xiaotong ZHANG, 2021.

Yu LI

Élève ingénieure double diplôme
Tsinghua University, Pékin, Chine

Promotion 2018

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Tsinghua University

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Chengwen WANG, professeur

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Fabien ESCULIER, chercheur, LEESU, École des Ponts ParisTech

Recherche sur le traitement biologique des urines visant à produire une solution nutritive

Mots-clés : urines, traitement biologique, nitrate d'ammonium, osmose inverse, solution nutritive pour plantes

Contexte

Le traitement des eaux usées contenant de l'azote est difficile. La dénitrification est une méthode courante. Elle nécessite une source de carbone suffisante. Mais le rapport carbone-azote des urines est faible, ce qui rend sa dénitrification plus difficile. De plus, la dénitrification ignore la propriété des ressources de l'azote. Il est donc nécessaire d'étudier de quelle manière récupérer l'azote, tout en éliminant la DCO (demande chimique en oxygène) et les odeurs des urines.

Missions et objectifs

Les missions et les objectifs sont :

- analyser des caractéristiques des urines directement collectées dans l'urinoir ;
- essayer de traiter des urines et produire une solution nutritive de nitrate d'ammonium pour les plantes ;
- proposer un processus combiné de traitement biologique BRM (bioréacteur à membrane) et d'osmose inverse pour traiter les urines et récupérer les ressources

Résumé

La nature des urines directement collectées par l'urinoir a été étudiée et un traitement biologique a été appliqué. Profitant de la faible alcalinité des urines, sans ajuster artificiellement le pH, et après traitement biologique dans un bioréacteur à membrane, la moitié de la quantité d'azote contenue dans les urines est nitrifiée en nitrate, tandis que l'autre moitié reste sous forme d'ammonium. Une nitrification stable en demi-quantité est ainsi obtenue.

L'effet d'enrichissement de la technologie d'osmose inverse sur l'effluent du traitement biologique a été étudié. Dans les meilleures conditions de fonctionnement, l'osmose inverse peut obtenir un bon effet d'enrichissement sur les urines traitées. Le taux de récupération d'eau atteint 84,7 %. Les éléments nutritifs peuvent être enrichis environ 5 fois. Le rétentat peut être récupéré et considéré comme une solution de nitrate d'ammonium avec une concentration maximale de 6 480 mg·L-1. Au cours du processus d'enrichissement, 3 types de membranes présentent tous un certain degré d'encrassement des membranes. Le nettoyage et le remplacement des membranes doivent être envisagés lors d'un fonctionnement à long terme.

Un procédé combiné de traitement biologique BRM et d'osmose inverse a été proposé pour traiter les urines collectées à l'urinoir et produire une solution nutritive de nitrate d'ammonium pour les plantes. Il est non toxique et inodore. Par rapport au groupe témoin vierge, il favorise le taux de germination, la hauteur des plantes, le nombre de feuilles et le rendement des épinards et des haricots à hauteur, respectivement, de 10 %, 20 %, 15 % et 100 %. Le coût direct d'exploitation de la production à grande échelle est de 0,54 yuan/bouteille.

Dispositif de traitement © Yu Li, 2021.

Study on the biological treatment of urine aiming at producing a nutrient solution

Keywords: urine, biological treatment, ammonium nitrate, reverse osmosis, nutrient solution

Context

The treatment of nitrogen-containing wastewater is always difficult. Denitrification, a common method, requires sufficient carbon resources. Urine wastewater has a low carbon-nitrogen ratio, making denitrification difficult. Furthermore, denitrification technology ignores the potential of nitrogen as a resource. It is thus necessary to study how to simultaneously recover nitrogen and remove COD (Chemical Oxygen Demand) and odor in urine.

Missions and goals

The missions and objectives are as follows:

- *Analyze the characteristics of urine as directly collected in urinals.*
- *Use urine to produce a nutrient solution of ammonium nitrate for plants.*
- *Propose a combined process of MBR (membrane bioreactor) biological treatment and reverse osmosis to treat urine and recover resources.*

Abstract

The nature of urine wastewater collected in urinals is investigated and a biological treatment is applied. Taking advantage of the lack of alkalinity of urine wastewater, rejecting an artificial adjustment of pH, and applying a biological treatment in a membrane bioreactor, half of the nitrogen in urine wastewater is nitrified while another half remains as ammonium. Stable half-quantity nitrification is achieved. The effluent can be considered as an ammonium nitrate solution with a concentration of about 1230 mg·L-1. When treating high concentration urine wastewater, nitrification interrupts and nitrite accumulates.

The enrichment effect of reverse osmosis technology on the effluent of biological treatment is investigated. Under optimal operating conditions, reverse osmosis can achieve a good enrichment effect on biologically treated urine wastewater. The water recovery rate reaches 84.7%. Nutrient elements can be enriched about 5 times. The retentate can be recovered and considered as an ammonium nitrate solution with a max concentration of 6480 mg·L-1. During the enrichment process, 3 types of membranes all display a certain degree of membrane fouling. Cleaning and replacement of the membranes should be considered during long-term operation.

A combined process of MBR biological treatment and reverse osmosis is proposed to treat urine wastewater collected by urinals and to produce an ammonium nitrate plant nutrient solution which is non-toxic and odorless. Compared with a blank control group, this solution can promote the germination rate, plant height, leaf number, and crop yield of spinach and beans by at least 10%, 20%, 15% and 100%. The direct operating cost of large-scale production is 0.54 yuan/bottle.

Épinards et haricots cultivés avec la solution nutritive de nitrate d'ammonium © Yu Li, 2021.

Anissa WARDI

Élève ingénieure concours commun
Parcours Eau et Environnement

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
VINCI

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Antoine SIMON, responsable environnement

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Émeric FORTIN, directeur académique, Master Transport et développement durable (TraDD), École des Ponts ParisTech

École des Ponts ParisTech

Confidentiel - 5 ans - Confidential

Pilotage d'un groupe de construction : l'intérêt d'une objectivation scientifique

Mots-clés : BTP, ACV, impacts environnementaux, stratégie environnementale

Contexte

Ce projet de fin d'études a été réalisé au sein de la Direction de l'Environnement de VINCI.

L'équipe est composée de 8 profils différents. Les membres de la direction agrègent, élaborent les stratégies environnementales du groupe et œuvrent au respect de ces stratégies et des réglementations internationales et nationales. Chaque membre de l'équipe est spécialiste d'un sujet (carbone, milieux naturels, économie circulaire, innovation verte) et même si certains sujets se recoupent parfois, ils travaillent seuls ou en groupe de 2, rarement plus.

Missions et objectifs

L'objectif du projet de fin d'études était d'étudier les inclusions possibles des méthodes d'analyse de cycle de vie dans la gestion de projets de construction.

Résumé

Un changement de modèle et une prise en compte des externalités environnementales s'opère du fait des incitations sociales, financières et des réglementations toujours plus nombreuses concernant les acteurs privés. Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) est au centre des préoccupations du fait de son empreinte écologique forte : aujourd'hui, 90 % des déchets sont dus au BTP. Le modèle d'affaire du secteur est déjà très concurrentiel et soumis à de nombreuses pressions monétaires. Les questions environnementales ne sont prises en compte que lorsqu'elles permettent un abaissement des coûts ou une augmentation de la performance. Dans un tel contexte, la mesure de la performance environnementale et l'intégration des enjeux environnementaux sont nécessaires. En effet, sans méthode de mesure précise et clairement établie, les stratégies environnementales seront laissées de côté et aucun travail ne pourra être fait pour l'amélioration environnementale des activités. Toutes les méthodes d'évaluation et d'analyse d'impacts existantes au sein d'un groupe comme VINCI nécessitent la création et le choix d'indicateurs représentatifs et fiables, afin d'objectiver quantitativement et scientifiquement les enjeux environnementaux auxquels font face les acteurs du BTP et le contexte environnemental et social dans lequel ces entreprises évoluent. Si une harmonisation de ces méthodes est souvent évoquée pour améliorer le *reporting* des impacts et enjeux et faciliter le choix des projets à privilégier au sein de l'entreprise, une telle harmonisation et la création d'un outil global n'est que très peu pertinent au niveau opérationnel.

Project management of a construction group: the interest of a scientific objectivization

Keywords: civil engineering, LCA, environmental impacts, environmental strategy

Context

I conducted my end-of-study project at the Environment Department of VINCI. The members of the Environment Department define, aggregate, and elaborate the group's environmental strategies and work to ensure compliance with these strategies and international/national regulations. Each member of the team is a specialist (carbon, natural environments, circular economy, green innovation) and even if some subjects overlap, they work alone or in groups of 2, rarely more, to address their issues.

Missions and goals

I studied the inclusion of life cycle assessment in construction project management.

Abstract

A change of model, based on a consideration of environmental externalities, is currently taking place due to social and financial incentives and ever-increasing regulations concerning private actors. The construction and civil engineering sector is at the center of concerns due to its strong ecological footprint: today, 90% of waste is due to construction actors. The business model of the building and public constructions sector is already very competitive and subject to numerous monetary pressures. The environment is only taken into account when it allows a reduction in costs or an increase in performance. In such a context, the measurement of environmental performance and the integration of environmental issues is necessary. This measurement is all the more necessary because without a precise and clearly established measurement method, environmental strategies will be left aside and no work can be done for the environmental improvement of activities. All the methods of evaluation and impact analysis that exist within a group like VINCI require the creation and choice of representative and reliable indicators in order to objectively and scientifically assess the environmental challenges faced by the construction industry and the environmental and social context in which these companies operate. While lip service is often paid to the harmonization of these methods in order to improve reporting on impacts and issues and to facilitate the choice of projects to be prioritized within the company, such harmonization and the creation of a global tool is only marginally relevant at the operational level.

Changtao YANG

Élève ingénieur ParisTech
Parcours Transport

Promotion 2018

Mission en entreprise réalisée à :
NOOCO

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Guillaume JARLOT, CEO

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Cyrille FRANÇOIS, chercheur, LVMT, École des Ponts ParisTech

Mise en place des conditions normales d'utilisation dans l'analyse du cycle de vie (ACV) du bâtiment

Mots-clés : ACV, bâtiment, carbone, exploitation, RE2020

Contexte

Afin de répondre à l'objectif de neutralité carbone, des efforts additionnels sont attendus dans le secteur du bâtiment, qui représente actuellement 18 % des émissions GES et 44 % des consommations d'énergie primaire en France. Pour évaluer la performance environnementale du bâtiment, la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) est toujours privilégiée du fait de sa large perspective holistique. En France, à partir de 2022, la réglementation environnementale RE2020 supplantera la réglementation thermique RT2012 et élargira son champ d'action. L'approche d'ACV simplifiée, utilisant les données de déclaration environnementale des produits de construction (EPD), est officiellement entrée dans la norme française pour l'évaluation environnementale du bâtiment. Néanmoins, les résultats de la phase d'utilisation des EPD seront abandonnés et remplacés par un bilan thermique effectué en amont.

Missions et objectifs

L'objet de ce mémoire est le développement d'un outil d'ACV simplifiée du bâtiment de Nooco qui, au-delà d'interpréter les règles de calcul RE2020, cherche surtout à réutiliser les données abandonnées de EPD.

Dans l'objectif de comparer les équipements de construction sur cet outil et de fournir une ACV du bâtiment indépendante du bilan thermique, nous allons proposer une nouvelle voie de calcul complémentaire en utilisant uniquement les données EPD. Elle sert :

- au niveau des équipements, à harmoniser le paramétrage de la phase d'exploitation du projet afin d'identifier les équipements impactants et les comparer avec un calcul d'ACV complète ;
- au niveau du bâtiment, à estimer les contributeurs aux consommations d'énergie et d'eau en absence de bilan énergétique, et donc de concevoir une méthode d'ACV du bâtiment indépendante.

Résumé

L'analyse de cycle de vie (ACV) simplifiée du bâtiment utilise principalement les données des déclarations environnementales des procédés, équipements et produits de construction. Néanmoins, les résultats de la phase d'utilisation de ces composants sont souvent abandonnés et remplacés par un bilan thermique du bâtiment. Dans ce mémoire, nous essayons de réaliser une ACV de bâtiment sans bilan thermique. Une conception de conditions normales d'utilisation (CNU) est proposée, en cherchant un équilibre entre la standardisation et la variabilisation des hypothèses. En utilisant les données de la base officielle INIES, sa mise en place dans une plateforme Saas a permis une voie de calcul complémentaire de la nouvelle réglementation environnementale française RE2020.

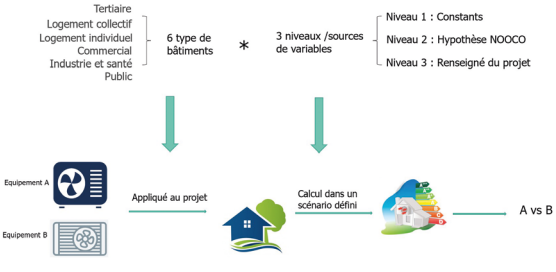


Illustration de CUN dans l'objectif de la comparaison des variants
© Changtao Yang, 2021.

Implementation of the normal conditions of use in building Life Cycle Assement

Keywords: LCA, building, carbon, EPD, RE2020

Context

In order to meet the objective of carbon neutrality, additional efforts are expected in the building sector, which currently represents 18% of GHG emissions and 44% of primary energy consumption in France. To assess the environmental performance of a building, the Life Cycle Assessment (LCA) method always receives priority due to its broad holistic perspective.

From 2022, the current thermal regulations in France (RT2012) will be extended to include environmental regulations (RE2020). The simplified LCA approach, using data from the environmental declaration of construction products (EPD), has officially entered the French regulations. Nevertheless, the results of the EPD use phase will be abandoned and replaced by a thermal balance carried out separetely.

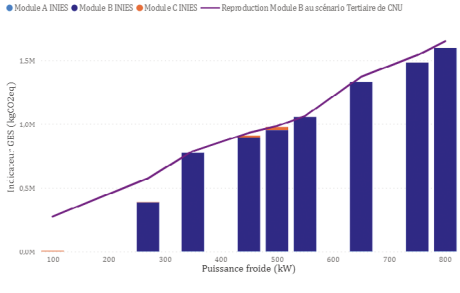
Missions and goals

The purpose of this final year project is to develop a simplified LCA integrated in Nooco which, apart from interpreting the RE2020 calculation rules, seeks above all to reuse the abandoned EPD data. With the aim of comparing construction equipment on this tool and providing an LCA of the building independent of the thermal balance, we propose a new complementary calculation method using only EPD data. This new complementary calculation channel is used:

- *at the level of construction equipments, to harmonize the configuration of the project's operating phase by identifying the impacting equipment and comparing it with a full LCA calculation;*
- *at the level of a building, to estimate the energy and water consumption in the absence of an energy balance, and therefore to design an independent LCA method.*

Abstract

The simplified Life Cycle Assessment (LCA) of buildings mostly uses data from Environmental Product Declarations (EPD). Nevertheless, the results of the use phase of these components are often abandoned and replaced by a thermal balance. In this brief, we try to conceive a LCA of a building without a thermal balance. We propose a notion of Normal Conditions of Use looking for a balance between standardisation and variabilisation of hypotheses. Using the French official database INIES, the implementation in a Saas platform allows a complementary way to the newest French environnemental regulation RE2020.



Fiches PEP existants de Groupe Froid et reproduction de module B au CNU © Changtao Yang, 2021.

Éléments de bibliographie

CEGIBAT, 2020. Bilan de l'expérimentation E+C- [en ligne]. *cegibat.grdf*, 19 mai 2020. Disponible sur : https://cegibat.grdf.fr/reglementation-energetique/bilan-experimentation-e-c (consulté le 02.05.2022).

FOUQUET, Marine, 2015. *Réflexions et contributions méthodologiques à l'ACV de bâtiments neufs : modélisation du contributeur énergie*. Thèse de doctorat : Génie civil et sciences de l'habitat. Saint-Martin d'Hères : université Grenoble Alpes.

GOULOUTI, Kyriaki, PADEY, Pierryves, GALIMSHINA, Alina *et al.*, 2020. Uncertainty of building elements' service lives in building LCA & LCC: What matters?. *Building and Environment*, octobre 2020, vol. 183, 106904.

Thomas GIOVAGNOLI

Élève ingénieur concours commun
Parcours Eau et Environnement

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Agence de l'Eau Seine-Normandie

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Anne BELBEOC'H, chargée de projet politique territoriale et coopération internationale

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Bruno TASSIN, directeur de recherche, LEESU, École des Ponts ParisTech

Regards croisés autour de la GIRE en Afrique de l'Ouest

Mots-clés : GIRE, cadre institutionnel, initiative locale, Niayes, Basse et Moyenne Vallée de l'Ouémé

Contexte

Depuis de nombreuses années, les pays d'Afrique de l'Ouest mettent en avant une approche de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE).

Pourtant, malgré les annonces officielles et la succession de plans d'actions GIRE, cette dernière peine à se mettre concrètement en place, en particulier, à l'échelle locale. Aussi, plusieurs projets d'ONGs ou de recherche s'interrogent sur les conditions de mise en œuvre de politiques de protection des ressources en eau, sous contrainte d'équité dans l'accès à ces ressources et d'ancrage local.

Missions et objectifs

L'objectif de ce stage est de présenter des recommandations pour la mise en œuvre d'une politique de gestion des ressources en eau qui permette d'assurer durablement et équitablement un accès à ces ressources tout en les préservant. Il s'inscrit dans le travail d'un groupe de réflexion composé de porteurs de projet au Bénin, au Burkina Faso et au Sénégal. Dans un premier temps, nous interrogeons les manières dont la GIRE a circulé et dont elle a été institutionnalisée. Dans un second temps, nous nous intéressons à des expérimentations de mise en place de gouvernances locales au Bénin et au Sénégal. Nous étudions si elles questionnent le modèle GIRE en proposant des alternatives pour un partage équitable et durable, ainsi que la préservation des ressources en eau.

Résumé

Différents auteurs ont montré que, généralement, les politiques GIRE n'étaient pas élaborées en réponse à des problématiques locales mais qu'elles cherchaient à être au plus près du modèle GIRE international. Ce mémoire se saisit de deux initiatives GIRE locales au Sénégal et au Bénin afin d'interroger la capacité de la GIRE à répondre aux enjeux eau d'un territoire. Ce faisant, il s'intéresse à l'articulation entre le cadre institutionnel national et ces initiatives locales. Au Bénin et au Sénégal, la GIRE a circulé par le biais d'une multitude d'acteurs ayant chacun sa vision propre de ce modèle. Le manque de coordination entre ces visions a pu entraver l'institutionnalisation de la GIRE à l'échelle nationale. Le cadre institutionnel est encore très centralisé et il est nécessaire que l'État s'approprie la gestion des ressources en eau et en provpose sa vision. Des initiatives locales, participatives et co-construites avec les populations permettent d'identifier les enjeux eau des territoires et d'y répondre. Cependant, elles sont encore très récentes et nécessiteront l'intervention de l'État pour être pérennes.

Séance de concertation avec un groupe d'acteurs locaux dans la Vallée de l'Ouémé au Bénin © Médard Dahodo, 2020 (avec son autorisation).

Crossed perspectives on IWRM in West Africa

Keywords: IWRM, institutional framework, local initiative, Niayes, Basse et Moyenne Vallée de l'Ouémé

Context

For many years, West African countries have been promoting an Integrated Water Resources Management (IWRM) approach. However, despite official announcements and a succession of IWRM action plans, this approach is struggling to be implemented in practice, particularly at the local level. Therefore, several NGOs and research projects are looking into the conditions for implementing water resource protection policies under the constraint of equity in access to these resources and local anchoring.

Missions and goals

The objective of this internship is to present recommendations for the implementation of a water resources management policy that will ensure sustainable and equitable access to these resources while preserving them. It is part of the work of a think tank composed of project leaders in Benin, Burkina Faso, and Senegal. First, we examine the ways in which IWRM has been circulated and institutionalised. Secondly, we look at experiments in setting up local governance in Benin and Senegal. We study whether these question the IWRM model by proposing alternatives for an equitable and sustainable sharing and preservation of water resources.

Abstract

Various authors have shown that IWRM (Integrated Water Resources Management) policies were not generally developed in response to local issues but sought to be as close as possible to the international IWRM model. This paper takes two local IWRM initiatives in Senegal and Benin to examine the capacity of IWRM to address the water challenges of a territory. In so doing, it focuses on the articulation between the national institutional framework and these local initiatives. In Benin and Senegal, IWRM has circulated through a multitude of actors, each with their own vision of this model. The lack of coordination between these visions may have hindered the institutionalisation of IWRM at the national level. The institutional framework is still highly centralised and there is a need for the state to take ownership of water resources management and to propose its vision. Local, participatory initiatives, co-constructed with the populations, make it possible to identify and respond to the water challenges of the territories. However, they are still very recent and will require the intervention of the state to be sustainable.

Solutions fondées sur la nature pour lutter contre les effets du ruissellement dans la Vallée de l'Ouémé au Bénin
© Médard Dahodo, 2020 (avec son autorisation).

Yunlu ZHAO

Élève ingénieure double diplôme
Université de Tongji, Shanghai, Chine

Promotion 2019

Mission en entreprise réalisée à :
Suez

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Pierre BONARDET, responsable solutions et nouveaux produits

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Vincent LEFIEUX, enseignant, ENSAE-ENSAI, chef du pôle Data science-Intelligence artificielle, RTE

Méthodologies d'amélioration de performance de réseau de distribution d'eau potable

Mots-clés : réseau de distribution d'eau, *Machine Learning, Random Forest,* reconnaissance de motifs d'anomalies

Contexte

Avec de nombreuses canalisations construites pendant le XX^{e} siècle, et la population augmentant, le réseau de distribution d'eau potable est en face de plusieurs défis, par exemple, le renouvellement et le remplacement des infrastructures d'eau vieillissantes, la stabilité et la sécurité de service, la conservation et l'efficacité de l'eau, *etc.* Afin d'améliorer la performance de réseau d'eau potable, la gestion du patrimoine et la gestion de pression jouent un rôle important.

Basés sur des données d'infrastructures physiques enregistrées dans le SIG (système d'information géographique) et celles collectées par SCADA (système de contrôle et d'acquisition de données) et par des capteurs, des méthodes AI (intelligence artificielle) ou *Machine Learning* sont de plus en plus appliquées afin de mieux connaître le fonctionnement de réseau et de finalement améliorer le niveau d'opération et de maintenance de réseau. Cela aide à optimiser l'investissement de capital et à diminuer le coût opérationnel.

Missions et objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études est double :

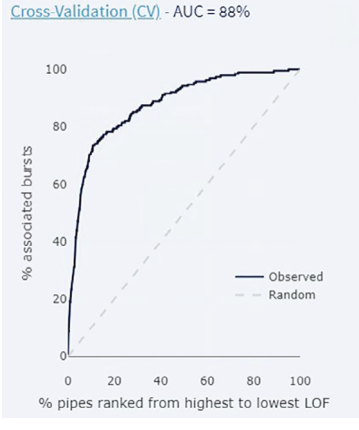
- estimer et analyser le risque de fuites et casses des canalisations et proposer un plan de renouvellement pour un cas d'étude réel ;
- exploiter une méthodologie pour la reconnaissance de motifs d'anomalies en utilisant les données de pression dans un réseau de distribution d'eau.

Résumé

Ce mémoire présente le travail d'implanter deux stratégies d'aide à la décision basées sur le *Machine Learning*.

Pour l'évaluation des risques de fuites des canalisations, FastLOF, un outil d'aide à la décision basé sur *Random Forest*, développé par CTD, a été mise en œuvre dans un projet réel de Macao. Des stratégies d'interprétation de résultats de FastLOF et de regroupement des canalisations sont également développés afin d'adapter cette méthode de pure *Machine Learning* au projet réel complexe. Le résultat montre que si 25,8 % de canalisations identifiées les plus dégradées seraient remplacées, 70 % de fuites et casses seraient préventivement évitées.

Pour la détection de motif d'anomalies de pression, une méthodologie basée sur DTW et K-means est réalisée. Elle est composée par : le traitement de données temporelles, le calcul d'événement moyen, la reconnaissance de similarité avec DTW sur les fenêtres glissantes, et puis un post-traitement avec un filtre de sévérité et un modèle de *clustering*. Elle permet de reconnaître un type d'événement depuis une série de données temporelles.



Courbe de validation de FastLOF © Yunlu Zhao, 2021.

Implementation of Machine Learning strategies to improve the performance of WDNs

Keywords: water distribution network, Machine Learning, Random Forest, pattern detection

Context

With many pipes built during the 20th century, and the rise in population, the drinking water distribution network (WDN) is facing several challenges, such as renewal and replacement of aging water infrastructures, service stability and security, and water conservation and efficiency. In improving the performance of the drinking water network, asset management and pressure management play important roles.

Based on physical infrastructure data recorded in GIS (geographic information system) and collected by SCADA (supervisory control and data acquisition) and sensors, AI (artificial intelligence) or Machine Learning methods are increasingly applied in order to better understand WDN behaviors and ultimately improve operation precision and maintenance effectiveness. This helps to optimize capital investment and lower operational costs.

Missions and goals

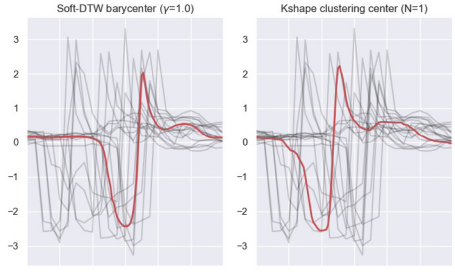
The objective of this graduation project is twofold:

- *Estimate and analyze the risk of failure of pipes and propose a renewal plan for a real case study.*
- *Develop a methodology for anomaly patterns recognition using high-frequency pressure data.*

Abstract

This thesis presents the implementation of two decision support strategies based on Machine Learning. For the assessment of pipeline leak risks, FastLOF, a Random Forest-based decision support tool, developed by CTD, was implemented in a real project in Macau. Strategies for interpreting the results of FastLOF and grouping pipes are also developed in order to adapt this pure Machine Learning method to the complex real project. The result shows that if 25.8% of pipes identified as the most degraded were replaced, 70% of leaks and breakages would be preventively avoided.

For pressure anomaly pattern detection, a methodology based on DTW and K-means is used, composed of temporal data processing, average event calculation, similarity recognition with DTW on sliding windows, and then post-processing with a severity filter and a clustering model. This allows recognition of a type of transient event from a series of temporal pressure data.



Extraction d'évènement moyen avec SoftDTW et Kshape
© Yunlu Zhao, 2021.

Éléments de bibliographie

FARMANI, Raziyeh, KAKOUDAKIS, Konstantinos, BEHZADIAN, Kourosh *et al.*, 2017. Pipe failure prediction in water distribution systems considering static and dynamic factors. *Procedia Engineering*, vol. 186, pp. 117-126.

VICENTE, David J., GARROTE, Luis, SÁNCHEZ, Raúl *et al.*, 2016. Pressure management in water distribution systems: Current status, proposals, and future trends. *Journal of Water Resources Planning and Management*, février 2016, vol. 142, n° 2, 04015061.

ZHOU, Xiao, TANG, Zhenheng, XU, Weirong *et al.*, 2019. Deep learning identifies accurate burst locations in water distribution networks. *Water research*, décembre 2019, vol. 166, 115058.

Matias BREGGIA

Élève ingénieur double diplôme
Parcours Transport
Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentine

Promotion 2020

Mission en entreprise réalisée à :
Ingérop Conseil et Ingénierie, France

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Camille FOREY, chef de projet

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Zoï CHRISTOFOROU, responsable de module,
École des Ponts ParisTech

Restructuration d'un réseau bus : quels apports de la modélisation ? Le cas de Dakar

Mots-clés : modélisation, transport, BRT, restructuration

Contexte

En raison de la mise en œuvre de changements imminents dans l'infrastructure de transport de la ville de Dakar pour permettre l'exploitation des systèmes BRT et TER, la nécessité d'une étude sur la restructuration du réseau de bus existant se pose afin d'assurer la rentabilité et le bon fonctionnement du réseau de transport dans son ensemble.

Missions et objectifs

L'étude se concentre sur le projet de restructuration du réseau de bus, soutenu par une analyse de la demande par modélisation. L'outil de modélisation permet d'estimer et de tester les possibilités, les combinaisons et l'efficacité de chaque ligne, ce qui serait autrement impossible à estimer en raison du nombre de variables et de la complexité d'un réseau de transport aussi vaste et complexe.

Résumé

Ce projet de fin d'études a été développé dans le cadre du projet de restructuration du réseau de bus de la ville de Dakar, en raison de l'intégration d'un système BRT sur l'axe principal de la ville.

Le système de transport public de Dakar est un système complexe et diversifié, avec un système de transport public formel et structuré composé de deux opérateurs et de plus de 100 lignes de bus. D'autre part, il existe un réseau de transport informel, complémentaire aux précédents, qui a également été inclus dans l'étude.

Pour mener à bien le projet, la modélisation de la demande a été réalisée dans le programme PTV Visum, dont l'objectif de base était d'obtenir un modèle simple et efficace, en présentant ses étapes de calibration, ainsi que la création et la comparaison de scénarios.

Un processus itératif de restructuration a été réalisé, grâce à l'étude des différents scénarios et au travail en atelier, obtenant des améliorations dans l'exploitation et prévoyant donc l'optimisation du réseau de transport en général.

Chevelu du BRT en situation de référence © Matias Breggia, 2019. Fond de carte : Contributeurs d'Open Street Maps, 2019, CC-BY-SA (source : OpenStreetMap).

Restructuring of a bus network: what contribution can modeling make? The case of Dakar

Keywords : modeling, transport, BRT, restructuring

Context

Due to the implementation of imminent changes in the transport infrastructure of the city of Dakar to allow for the operation of the BRT and TER systems, the need for a study on the restructuring of the existing bus network arises in order to ensure the profitability and proper functioning of the entire transport network.

Missions and goals

The study focuses on the bus network restructuring project, supported by a demand analysis through modeling. The modeling tool allows the estimation and testing of the possibilities, combinations, and efficiency of each line, which would otherwise be impossible to estimate due to the number of variables and the complexity of such a large and complex transport network.

Abstract

This final year project was developed in the framework of the project of restructuring the bus network of the city of Dakar, due to the integration of a BRT system in the main axis of the city.

Dakar's public transport system is a complex and diversified system, with a formal, structured public transport system involving two operators and more than 100 bus lines. On the other hand, there is an informal transport network, complementary to the previous ones, which was also contemplated in the study.

To carry out the project, a demand modeling was carried out in the PTV Visum program with the basic objective of achieving a simple and effective model, presenting its calibration stages, as well as creating and comparing various scenarios.

An iterative process of restructuring was carried out, thanks to the study of the different scenarios and workshop work, obtaining improvements in the operation and therefore enabling the optimization of the transport network in general.

Charge du réseau en situation réseau restructuré initiale
© Matias Breggia, 2019. Fond de carte : Contributeurs d'Open Street Map, 2019, CC-BY-SA (source : OpenStreetMap).

Éléments de bibliographie

BENEZECH, Vincent et COULOMBEL, Nicolas, 2013. The value of service reliability. *Transportation Research Part B: Methodological*, décembre 2013, vol. 58, pp. 1-15.

BONNEL, Patrick, 2002. *Prévision de la demande de transport*. Thèse de doctorat : Économies et finances. Lyon : université Lumière Lyon 2.

DE DIOS ORTUZAR, Juan et WILLUMSEN, Luis G., 2008. *Modelos de transporte*. Santander : Editorial Universidad de Cantabria, 711 p.

Rafael Henrique CARNEIRO TAVARES

Élève ingénieur double diplôme
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brésil

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Ingérop Conseil et Ingénierie

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Shaoqing WANG, chef de projet senior

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Florent LE NECHET, chercheur, LVMT, École des Ponts ParisTech

Choix discrets : s'adapter à la problématique tout en gardant la fiabilité des résultats

Mots-clés : choix discrets, mobilité, modèles Logit, transport routier, épistémologie

Contexte

Les modèles de choix discrets (MCD) sont couramment employés pour étudier les comportements en matière de déplacements. Ils sont toujours accompagnés d'une incertitude proportionnelle à la complexité de la problématique. Si la littérature et les données observées permettent la validation des résultats jusqu'à un certain point, les validateurs externes sont souvent contraints de faire confiance à la capacité du modélisateur de construire un prototype adéquat.

Missions et objectifs

L'étude s'articule autour de la construction d'un modèle de choix d'itinéraire routier : il s'agit d'un MCD du type Logit, où les alternatives sont les différents types de route qu'un usager peut emprunter lors de ses trajets habituels. Les sorties du modèle seront appliquées dans les affectations routières du projet A31bis, qui porte sur l'amélioration de l'autoroute A31 en Lorraine.

Les deux principaux objectifs sont l'obtention de valeurs du temps et malus kilométriques cohérents et la segmentation de la demande selon les critères préétablis par le client. En plus, il faut respecter le principe de parcimonie en proposant un modèle, dans la mesure du possible, simple et exempt d'attributs superflus.

Résumé

La versatilité est le principal mérite des MCD pour une application d'ingénierie. La méthodologie proposée construit le modèle de manière presque modulaire : on part d'un prototype très simple et on intègre des attributs, structures et segmentations selon leur performance. Les structures mixtes, dont l'optimisation est itérative et assez chronophage, ne sont intégrées qu'à la fin du projet.

Plusieurs solutions *ad hoc* ont été proposées compte tenu de l'application prévue. Ces artifices dépendent du discernement du modélisateur, puisque des modifications sans fondement gênent la crédibilité du modèle. C'est pourquoi le client, qui doit être convaincu de la vraisemblance des résultats, a participé aux principales décisions sur la structuration des prototypes.

Si le modèle final est ouvert à des améliorations et n'ambitionne pas d'être extrapolé en dehors du contexte du projet, il répond aux objectifs préétablis en fournissant des paramètres plausibles et bien adaptées au périmètre d'étude. La méthodologie de construction, assez pragmatique, pourra être réappliquée sur des études similaires menées par Ingérop.

		Segment de demande							
		Nationaux 0-20 km		Nationaux 21-75 km		Nationaux 76-200 km		Trans frontalier	
Motif de trajet	DT	1,00	4,13	1,00	4,13	1,00	6,67	1,00	2,27
	Pro	0,83	3,43	0,83	3,43	0,72	4,79	0,72	1,63
	Perso	0,78	3,20	0,78	3,20	0,42	2,77	0,63	1,42
		Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
		Remboursement de frais							

Facteurs de pondération de la valeur du temps obtenus par le modèle

© Rafael H. C. Tavares, 2021.

Discrete choices: adapting to the problem while maintaining the reliability of the results

Keywords: discrete choices, mobility, Logit models, road transport, epistemology

Context

Discrete Choice Models (DCM) are commonly used to study travel behavior. They are always accompanied by an uncertainty that is proportional to the problem's complexity. The literature and the observed data allow for the validation of the results up to a certain point, although external validators are often forced to trust the modeler's ability to build an adequate prototype.

Missions and goals

This study revolves around the construction of a road route choice model – a Logit-type DCM, where the alternatives are the different types of roads a user can choose during his usual journeys. The DCM outputs will be applied in the route assignments for the A31bis, a project that focuses on improving the A31 motorway in Lorraine.

The two main objectives are to obtain consistent values of time and mileage penalties, and to segment demand according to criteria pre-established by the contractor. In addition, the principle of parsimony must be respected by proposing a model as simple and free of superfluous attributes as possible.

Abstract

Versatility is the main merit of DCMs for engineering applications. The proposed methodology builds the model in an almost modular way: it starts from a very simple prototype, and then integrates attributes, structures, and segmentations according to their performances. Mixed structures are only integrated at the end of the project because their optimization is iterative and considerably time-consuming.

Several ad hoc solutions have been proposed considering the intended application. These artifices depend on the discernment of the modeler since unfounded modifications hinder the model's credibility. This is why the contractor, who must be convinced of the likelihood of the results, participated in the main decisions regarding the prototypes.

If the final model is open to improvements and refrains from extrapolations outside the project's concept, it meets the pre-established objectives by providing parameters that are plausible and well-adapted to the scope of the study. The fairly pragmatic construction methodology can be reapplied to similar studies conducted by Ingérop.

		Segment de demande		
		Nationaux 0-20 km	Nationaux 21-75 km	Nationaux 76-200 km	Trans frontalier
Classe de voie	A1/A2	0,00	0,00	0,00
	B1	0,46	0,94	0,60
	B2	0,71	0,92	0,67
	C	1,17	1,82	1,13
	D	1,93	3,13	2,25

Malus kilométriques (selon le type de voie) obtenus par le modèle © Rafael H. C. Tavares, 2021.

Éléments de bibliographie

MENAPACE, Luisa et RAFFAELLI, Roberta, 2020. Unraveling Hypothetical Bias in Discrete Choice Experiments. *Journal of Economic Behavior & Organization* [en ligne], août 2020, vol. 176, pp. 416-430. DOI: 10.1016/j.jebo.2020.04.020.

CEREMA, 2019. *Recommandations pour la réalisation d'études de trafic et d'évaluations socio-économiques de projets d'infrastructure de transport routier*. S. L. : Cerema, 38 p. Collection « Expériences et pratiques ».

PONS, Damien, 2011. *Mise en place d'enquêtes par préférences déclarées dans le cadre de projets d'étude relatifs au secteur des transports de personnes*. Thèse de doctorat : Sciences économiques. Lyon : université Lumières Lyon 2.

Akihiro IIDA

Élève ingénieur double diplôme
Parcours Transport
Université de Tokyo, Japon

Promotion 2019

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Université de Tokyo

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Riki HONDA, professeur, université de Tokyo

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Serge LHOMME, chercheur, Université Paris-Est Créteil

École des Ponts ParisTech

Évaluation des risques des réseaux routiers à capacité dégradée pendant la restauration

Mots-clés : évaluation des risques, réseau routier, dégradation de la capacité, restauration

Contexte

Après un désastre, il faut éviter la grave détérioration des performances du réseau routier. Ces événements rares entraînant d'énormes pertes sont appelés des risques extrêmes, et la congestion grave des autoroutes est un exemple. L'une des principales causes de ces événements est la dégradation de la capacité des arcs de réseau, mais il est difficile d'évaluer à l'avance ces risques en raison du grand nombre de modèles de dommages potentiels.

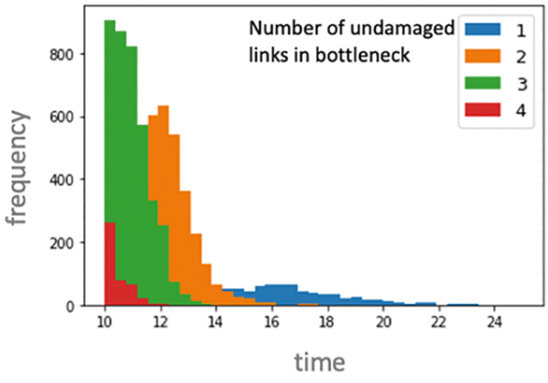
Missions et objectifs

De nombreuses recherches antérieures traitent l'évaluation des risques du réseau routier en cas de perturbation des arcs, mais celles sur la dégradation de la capacité sont limitées. De plus, peu de recherches antérieures considèrent l'incertitude de la demande de trafic pendant la période de restauration. Alors, notre objectif est de proposer une méthode d'évaluation des risques du réseau routier en tenant compte de la période de restauration.

Résumé

L'évaluation des risques a été réalisée en identifiant la condition topologique du réseau qui entraîne une grave détérioration des performances. La détérioration des performances se produit lorsque la forme du bouchon entre l'origine et la destination remplie une certaine condition. Ainsi, nous avons développé une méthode qui permet d'identifier de tels bouchons, et de restaurer les arcs critiques qui conduisent à l'élimination de ce bouchon. Le bouchon peut être identifié rapidement en utilisant la graphe double. Ensuite, les arcs critiques peuvent être identifiés en généralisant le concept de centralité d'intermédiaire, qui est un indicateur existant pour mesurer l'accessibilité d'un réseau. Notre méthode peut identifier l'arc le plus critique pour un modèle de désastre particulier, et donc en effectuant des simulations de Monte Carlo pour des milliers de modèles de dommages, il est possible d'identifier les arcs les plus critiques pour diverses conditions de dommages.

La méthode proposée a été appliquée à un réseau existant à Shikoku, au Japon. Shikoku est une région située dans la partie Sud-Ouest du Japon et considérée comme très vulnérable au tremblement de terre de Nankai, qui devrait se produire dans un avenir proche. Nous avons constaté que la méthode permet d'identifier efficacement non seulement les artères qui sont cruciales pour assurer la capacité de trafic, mais aussi les arcs critiques locales. En prenant des mesures préventives pour ces arcs, nous pouvons éviter l'apparition d'événements à risque et contribuer à une reprise rapide. Ces arcs identifiés sont importants pour fournir une sauvegarde au réseau et éviter les événements à risque extrême.



Distribution du temps de trajet classé par le nombre d'arcs endommagées dans le bouchon © Akihiro Iida, 2021.

Risk evaluation of capacity-degraded road networks during the restoration period

Keywords: risk evaluation, road network, capacity degradation, restoration

Context

After disasters, it is important to avoid severe deterioration of road network performance. These rare events that entail huge losses are called tail risk events, and severe congestion on highways is one example of possible consequences. One of the main effects of such events on the road network is the degradation of the capacity of multiple roads, but it is difficult to evaluate disaster risks as related to the road network in advance due to the high number of potential damage patterns.

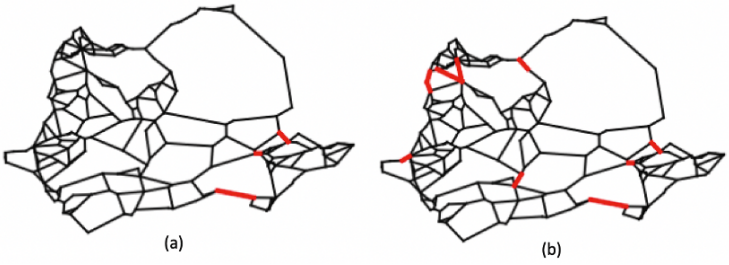
Missions and goals

Past research has extensively treated the topic of risk evaluation of road networks with link disruption, but the research on capacity degradation remains limited. Moreover, past research has rarely considered the uncertainty of traffic demand during the restoration period. The objective of my research is to propose an efficient risk evaluation method for road networks during the restoration period.

Abstract

Risk evaluation was conducted by identifying the topological condition of the network which causes serious deterioration of network performance. A serious deterioration of network performance occurs when the form of the bottleneck between the origin and the destination meets a certain condition. In this research, we developed a method which enables the identification of such bottlenecks and restores the critical links, thereby eliminating bottlenecks. The bottlenecks could be identified rapidly by using a dual graph. Then, the critical links could be identified by generalizing the concept of betweenness centrality, which is an indicator to measure the accessibility of a network. The proposed method can be used to identify the most critical link for a particular disaster pattern, so by conducting a Monte Carlo simulations for thousands of damage patterns, it is possible to identify the most critical links for various damage conditions.

The proposed method was applied on an existing network in Shikoku, Japan. Shikoku is a region in the south-western part of Japan and said to be highly vulnerable to the Nankai Earthquake. We found that the method can efficiently identify not only arterials which are crucial for securing traffic capacity, but also local critical links. By taking preventive measures for these links, we can avoid the occurrence of tail risk events and contribute to a rapid recovery. These identified links are significant in terms of providing a backup for the network and avoiding tail risk events.



Arcs critiques identifié par le méthode proposée (a: trois premier arcs, b: dix premier arcs) © Akihiro Iida, 2021.

Félix MOAL

Élève ingénieur Polytechnique

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Golfe du Morbihan – Vannes agglomération

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Anne-Hélène LE GALL – ROUSSEAU, directrice de la mobilité

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Mariane THEBERT, chercheuse, LVMT, université Gustave Eiffel

Concilier transition écologique de la mobilité et cohésion sociale à l'échelle des CA

Mots-clés : mobilité, collectivité, plan de mobilité, transition écologique, cohésion sociale

Contexte

La mobilité est un enjeu majeur, tant pour le développement économique des territoires que pour la mise en œuvre de la transition écologique ou de la cohésion sociale, sujets apparus plus récemment dans le débat public. Des documents de planification en 1982 pour permettre à l'action publique de s'emparer du sujet des déplacements à l'échelle des villes. En 2019, la loi d'orientation des mobilités étend la portée de ces Plans de Mobilité à l'ensemble du territoire français et renforce leur contenu et leur force.

Missions et objectifs

La mission du projet de fin d'études (PFE) visait à élaborer un état d'avancement de la mise en œuvre du Plan de Déplacements Urbains (PDU) de GMVA (Golfe du Morbihan – Vannes agglomération), en vue de son évaluation à mi-parcours. Alors que les PDU sont parfois perçus comme des documents procéduriers et peu opératoires, le PFE a ainsi été l'occasion de traiter la problématique suivante : « comment les communautés d'agglomération s'outillent-elles au regard de leurs moyens pour engager la transition écologique de la mobilité sur leur territoire tout en respectant les enjeux de cohésion sociale ? Dans quelle mesure l'outil du PDU apporte-t-il une réponse pertinente à ces enjeux ? ».

Résumé

La mise en œuvre de politiques de mobilité à l'échelle des collectivités territoriales et de leurs groupements, si elle doit aujourd'hui contribuer à l'engagement de la transition énergétique et écologique des territoires, répond à des enjeux territoriaux spécifiques. Il s'agit en particulier de répondre aux besoins de mobilité des habitants et des actifs, tout en réfléchissant à des solutions pour réduire les déplacements contraints et rendre plus vertueuses l'ensemble des chaînes de déplacements. Cela implique parfois de favoriser l'accès à la mobilité de publics qui en sont éloignés, que ce soit par leur situation géographique ou économique. On voit ainsi très vite qu'au-delà d'un important enjeu de développement économique local, transition écologique et cohésion sociale peuvent constituer des enjeux antagonistes. Afin de les concilier, la loi fournit un cadre réglementaire qui unifie la gouvernance de ces secteurs d'action publique et détermine leurs principales orientations conformément à ces deux enjeux en imposant la mise en oeuvre de plans de mobilité. Malgré cela, les collectivités font face à des difficultés structurelles qui peuvent obérer le succès de ces démarches. Le présent mémoire vise à discuter la pertinence de l'outil du plan de mobilité pour agir en faveur des enjeux antagonistes précités, tel qu'il est défini dans les textes et à la lumière de son usage concret, en s'appuyant sur l'exemple de GMVA.

Reconciling an eco-friendly shift of mobility and social cohesion at the local scale

Keywords: mobility, local authority, mobility planning, green transition, social cohesion

Context

Mobility is a major issue regarding economic and local development as well as the implementation of an ecological shift and of social cohesion, topics that have recently become prominent in public debate. Since 1982, French strategic documents have planned to allow public policy to tackle this issue at the scale of cities. In 2019, a new law extended the reach of those documents to all territories and reinforced their strength and content.

Missions and goals

This PFE aimed at drafting a monitoring plan and report for the mobility plan of GMVA so as to prepare for its mid-term evaluation. While mobility plans are reputed to be more by-the-book than operatory, this PFE adressed the following question: what tools do local authorities use to promote both an ecological shift and social cohesion in their jurisdictions according to their means? To what extent can mobility plans be considered a relevant tool in this context?

Abstract

Mobility policies at a local scale tackle global ecological issues as well as specific territorial concerns. On the one hand, these policies address travel demands by a place's inhabitants and workers, and can include reducing the number of mandatory trips and promoting more climate-friendly ways of moving such as car-sharing or biking. On the other hand, they can also provide people with mobility services which they are denied access to, whether it be because of modest incomes or remoteness to amenities. Thus, policies aiming both at a "green" transition of societies and lifestyles and at social cohesion can be challenging to implement, not to mention the issue of local economic development that is also at stake. French law has tried to unify the governance of such policies and orient them towards those two goals by decreeing so-called "mobility plans" to be mandatory as of 1996. In spite of this, local authorities struggle to succeed in planning mobility because of structural obstacles. The following essay aims at providing a discussion on the relevance of mobility plans in fulfilling the aforementioned goals, in theory and in their empirical implementation, based on the study case of the Golfe du Morbihan-Vannes agglomération.

Éléments de bibliographie

CENTRE D'ÉTUDES SUR LES RESEAUX, LES TRANSPORTS, L'URBANISME ET LES CONSTRUCTIONS PUBLIQUES (CERTU), 2001. *Observatoires des plans de déplacements urbains : de la méthode aux indicateurs*. Lyon : CERTU, 243 p.

DUCHENE, Chantal et CREPIN, Olivier, 2008. Les plans de déplacements urbains à la recherche d'un second souffle. *TEC : Transport Environnement Circulation*, vol. 198, pp. 25-35.

OFFNER, Jean-Marc, 2006. *Les plans de déplacements urbains*. Paris : La Documentation française, 96 p.

Enguerrand PRIÉ

Ingénieur élève du corps des IPEF
Mastère Spécialisé® Politiques et actions publiques pour le développement durable, École des Ponts ParisTech et AgroParisTech

Promotion 2019

Mission en entreprise réalisée à :
Institut Paris Région

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Frédérique PREDALI, chargée d'études

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Brice LAURENT, chercheur, CSI – Mines ParisTech

Les nouveaux instruments de l'action publique : modéliser pour évaluer et décarboner

Mots-clés : transports, modélisation, empreinte carbone, *Smart grid*, quantification

Contexte

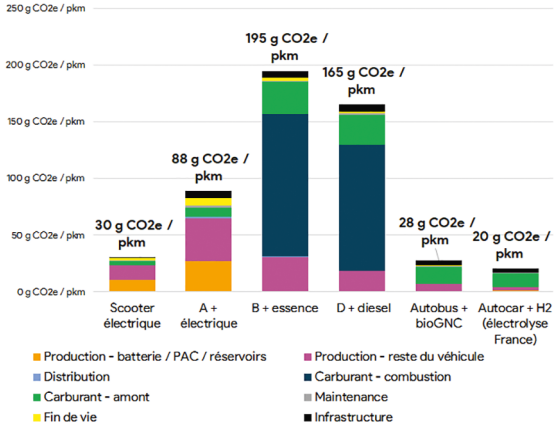
Ce projet de fin d'études a pris place au sein de l'Institut Paris Région, la plus grande agence d'urbanisme de la région Île-de-France. Sa mission est de « réaliser des études et travaux nécessaires à la prise de décision de la Région Île-de-France » sur des champs d'étude tels que « l'urbanisme, les transports et la mobilité, l'environnement, l'économie et les questions de société ».

Missions et objectifs

Deux sujets liés à la décarbonation des transports m'ont été attribués. Le premier consistait à développer un outil Excel de calcul de facteurs d'émissions pour toute combinaison d'un mode de transport et d'un carburant, ceci dans une logique de décomposition en cycle de vie dudit facteur. La seconde tâche était de produire un outil de modélisation et d'évaluation à long terme des impacts d'un projet de *smart grid* sur les plans économiques, environnementaux et sociaux dans le cadre du programme européen CleanMobilEnergy.

Résumé

Selon l'inventaire SECTEN 2020, le transport intérieur représente 31 % du total des émissions nationales. Sa décarbonation est donc une priorité pour l'action publique. Le processus de modernisation de l'État a modifié la nature des instruments utilisés pour répondre à cet objectif. Inspirés du monde de la science et des entreprises, ils sont résolument rationnels, informatiques et transcrivent une volonté d'améliorer l'efficacité et la confiance en l'action publique. Les commandes réalisées durant ce PFE reflètent ces constats. Le premier calculateur développé produit des facteurs d'émissions pour tout mode et tout carburant. À travers une analyse des termes, des outils existants et des présupposés de construction, il constitue un espace de connaissance et de réflexion pour l'Institut. Dans le cadre du projet européen CME, le travail de refonte effectué sur l'outil d'évaluation propose un modèle mathématique et une interface simple d'utilisation pour les sites souhaitant expérimenter le système de management de l'énergie interopérable (iEMS). Les deux calculateurs développés font appel à de nombreuses données quantitatives. Leur nature incertaine et la pertinence des hypothèses de construction sous-jacentes à leur représentation simplifiée de la réalité interrogent d'autant plus les limites de ces nouveaux instruments rationnalisés. Leur utilisation « éclairée » doit susciter une réflexion collective régulière sur les présupposés effectués.



Exemple de facteurs d'émissions produits par l'outil pour le transport routier de passagers © Enguerrand Prié, 2021.

New instruments for public action: modelization to evaluate and decarbonize

Keywords: transports, carbon footprint, modelisation, Smart grid, quantification

Context

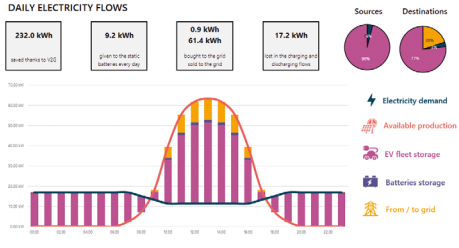
This PFE took place at the Paris Region Institute, the largest urban planning agency in the Ile de France region. Its mission is to "carry out studies and work necessary for the decision-making of the Ile-de-France Region" in fields such as "urban planning, transport and mobility, the environment, the economy, and social issues".

Missions and goals

I was assigned two topics related to the decarbonization of transportation. The first one was to develop an Excel tool to calculate emission factors for any combination of a transport mode and a fuel, in a life cycle decomposition logic of the said factor. The second task was to produce a tool to model and evaluate the long-term economic, environmental, and social impacts of a smart grid project within the framework of the European program CleanMobilEnergy.

Abstract

According to the SECTEN 2020 inventory, domestic transport represents 31% of total national emissions. Its decarbonization is therefore a priority for public action. The nature of the instruments used to meet this objective has changed in the couse of the state's modernization process. Inspired by the worlds of science and business, they are resolutely rational, computerized, and signal the desire to improve efficiency and confidence in public action. The tasks carried out during this mission reflect these observations. The first calculator produces emission factors for all modes and all fuels. It constitutes a space for sharing knowledge and questioning on this subject via the analysis of terms, existing aggregators, and assumptions about construction. Within the European CME project, the redesign work carried out on the Smarty evaluation tool proposes a mathematical model and an easy-to-use interface for sites wishing to experiment with the iEMS. The two calculators developed use a lot of quantitative data. Their uncertain nature and the relevance of the construction hypotheses underlying their simplified representation of reality further point to the limits of these new rationalized instruments. Their "enlightened" use must entail regular collective reflection on the assumptions made.



Exemple d'affichage des flux d'énergie d'une *smart grid* par le deuxième outil développé © Enguerrand Prié, 2021.

Éléments de bibliographie

AMANT, Stéphane, MEUNIER, Nicolas et DE COSSÉ BRISSAC, Côme, 2020. *Transport routier : quelles motorisations alternatives pour le climat ? Comparaison des émissions en cycle de vie, France et Europe* [en ligne]. S. L. : Carbone 4, 52 p. Disponible sur : https://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2020/12/Transport-Routier-Motorisations-Alternatives-Publication-Carbone-4.pdf (consulté le 03.05.2022).

RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ (RTE), 2019. *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique. Principaux résultats* [en ligne]. La Défense : RTE, AVERE France, 80 p. Disponible sur : https://www.concerte.fr/system/files/concertation/Electromobilite%CC%81%20-%20Synth%C3%A8se%20vFinale.pdf (consulté le 03.05.2022).

INSTITUT PARIS RÉGION, 2021. Mobilité électrique et *smart grids* : une synergie à développer. *Note rapide de l'Institut Paris Région*, février 2021, n° 882.

Shun TAMURA

Élève ingénieur double diplôme
Master of Civil Engineering, université de Tokyo, Japon

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Université de Tokyo

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Tomonori NAGAYAMA, professeur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Franziska SCHMIDT, chercheuse, université Gustave Eiffel

École des Ponts ParisTech

Méthodes d'analyse chronologique des chaussées mesurées avec les smartphones

Mots-clés : mesure des chaussées, rugosité, fissures, correspondance de GPS, segmentation sémantique

Contexte

La mesure des infrastructures routières vieillissantes est un grand enjeu dans le monde entier et des technologies basées sur les smartphones sont en train de se développer. Cependant, leur précision pour mesurer les deux aspects principaux de la chaussée, la rugosité et les fissures, est inférieure à celle mesurée de manière conventionnelle, de sorte que leurs analyses chronologiques soient impossibles pour trouver des changements progressifs sur l'état des chaussées.

Missions et objectifs

Cette étude fait partie d'un projet au sein du Bridge Laboratory à l'université de Tokyo pour développer un outil de mesures sur smartphones, iDRIMS. Pour améliorer sa précision et permettre des analyses chronologiques des chaussées, des post-traitements sont introduits et évalués avec le résultat des mesures réelles pour tous les deux aspects mesurables, la rugosité et les fissures. Plus précisément, pour le premier, qui est mesuré avec des accéléromètres de smartphone, la mission est de réduire les erreurs GPS de la rugosité longitudinale mesurée dans le sens de conduite. Pour le dernier aspect, qui est capturé avec une caméra de smartphone, il est nécessaire de concevoir un nouvel indice permettant de mieux évaluer la résistance structurelle de chaussée qui a un impact sur les changements chronologiques des fissures.

Résumé

Dans cette étude, la fonction de corrélation croisée des profils longitudinaux des chaussées mesurées a été utilisée pour réduire les erreurs GPS lors de la mesure de la rugosité, puis des analyses chronologiques avec cette rugosité corrigée ont été appliquées. Pour les fissures, au lieu d'un taux de fissures conventionnel, un indice alternatif corrélé à la résistance structurelle de chaussée, qui est préconisé pour avoir une relation hiérarchique avec les fissures, est proposé, en utilisant la segmentation sémantique et de post-traitement, et des comparaisons chronologiques sont également effectuées avec cet indice proposé.

En conséquence, la variance de la rugosité mesurée entre les enregistrements est significativement réduite par la méthode proposée (c'est-à-dire, l'erreur GPS est réduite) et, malgré les erreurs systématiques non supprimées dans les changements chronologiques de la rugosité, sa vitesse de détérioration s'avère élevée aux points d'une faible rugosité. Pour les fissures, un indice qui peut mieux prédire la résistance structurelle de chaussée que le taux de fissures conventionnel, le nombre d'intersections de fissures, est identifié, et la possibilité de capturer les changements chronologiques des fissures avec l'indice proposé est présentée.

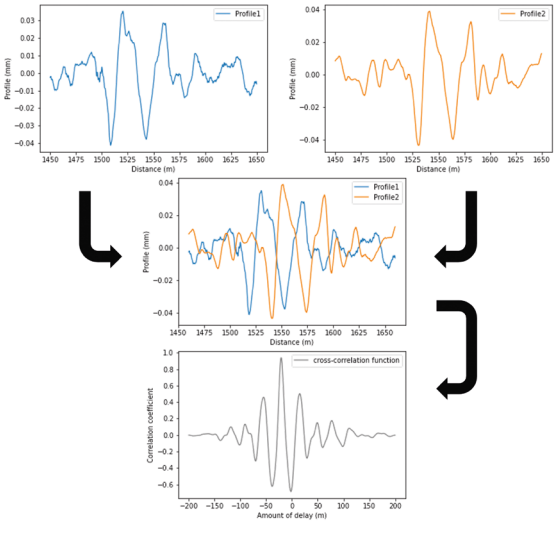


Schéma de calcul de la fonction de corrélation croisée normalisée
© Shun Tamura, 2022.

Chronological analysis methods of roads measured with smartphones

Keywords: road measurement, roughness, cracks, GPS matching, semantic segmentation

Context

The measurement of aging road infrastructures is a serious problem all over the world and smartphone-based technologies are now being developed for it. However, their accuracy in measuring two main aspects of road conditions, roughness and cracks, is lower than that of conventional measurements, so that their chronological analysis does not enable the determination of progressive changes inroad surface conditions.

Missions and goals

This study is part of a project at the Bridge Laboratory of the University of Tokyo to develop a smartphone-based measurement tool, iDRIMS. To improve its accuracy and enable chronological analysis of road conditions, post-processings are introduced and evaluated on hand of real measurement results for roughness and cracks. Specifically, for the former, which is measured with smartphone accelerometers, the mission is to reduce GPS errors in the driving direction of measured longitudinal roughness. For the latter, which are captured with a smartphone camera, it is to find another index that can better evaluate the structural road strength that has an impact on chronological crack changes.

Abstract

In this study, the cross-correlation function of road longitudinal profiles was used to reduce GPS errors in driving direction while measuring roughness, and then chronological analysis was performed in light of this corrected roughness. For the cracks, instead of a conventional crack ratio, an alternative index is proposed that correlates with the structural road strength, which is postulated to have a hierarchical relationship with the road surface cracks. Semantic segmentation and post-processing methods are used, and chronological comparisons are also conducted with this proposed index.

The variance of the roughness measured across records is significantly reduced by the proposed position matching (i.e., GPS errors are reduced), and, despite unremoved systematic errors in chronological roughness changes, deterioration speed is found to be high at poor roughness points. As for the cracks, an index is identified that can predict the structural road strength better than the conventional crack ratio, namely the number of crack intersections, and the possibility to capture chronological crack changes with the proposed index is presented.

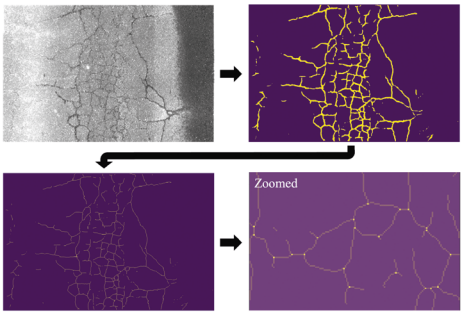


Schéma de traitement d'une image avec des fissures
© Shun Tamura, 2022.

Éléments de bibliographie

ZHAO, Boyu, NAGAYAMA, Tomonori, MAKIHATA, Noritoshi *et al.*, 2016. Iri estimation by the frequency domain analysis of vehicle dynamic responses and its large-scale application. *In*: HARA, Takahiro et SHIGENO, Hiroshi (eds.). *Adjunct Proceedings of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing Networking and Services*. pp. 41-46.

GEDA, Jose, Maria, 2021. *Estimation of pavement crack ratio by top-view transformation of in-vehicle camera images and deep learning-based classification*. Thèse de master. Tokyo : Université de Tokyo, 57 p.

Lou VALIDE

Formation complémentaire intégrée pour les polytechniciens civils

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
SOAME

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Nicolas GAUVIN, directeur général délégué

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Laurent PROULHAC, chercheur, LVMT, École des Ponts ParisTech

Développement des mobilités durables en Martinique

Mots-clés : mobilité, durabilité, modélisation, prospective, outil d'aide à la décision

Contexte

Les mobilités en Martinique font face à beaucoup d'enjeux aujourd'hui, autant environnementaux que sociaux et économiques. Le développement futur des mobilités peut-il mener à plus de durabilité ? Le terme de mobilités désigne le transport de personnes et celui de durabilité correspond à « répondre à nos besoins en transports de façon écologiquement rationnelle, socialement équitable et économiquement viable ». L'aspect insulaire de la Martinique en fait une sorte de monde miniature, système fermé particulièrement intéressant pour étudier des flux.

Missions et objectifs

Le but du projet était de mener un travail de recherche, de synthèse et d'analyse, mais aussi d'aboutir à des propositions concrètes de développement pour la SOAME, aménageur d'intérêt général en Martinique. Pour cela, il fallait dresser un état des lieux et analyser les pratiques de mobilité actuelles en Martinique, identifier les principales pistes d'évolution de ces mobilités vers des pratiques plus durables et tenter de chiffrer ces évolutions afin de finalement définir les secteurs à développer en conséquence pour la SOAME, en lien avec l'apparition de nouvelles pratiques, comme le développement des modes doux ou l'utilisation de nouvelles technologies.

Résumé

Une recherche bibliographique et des entretiens ont permis de dresser un état des lieux des mobilités actuelles et de leurs précédentes évolutions et de mettre en avant les principales problématiques des mobilités martiniquaises : accessibilité, coût et impact environnemental. Ces premières recherches ont également permis de dégager les principales pistes d'évolution et les décisions politiques nécessaires pour les développer. J'ai ensuite développé une modélisation qui m'a permis de projeter 3 scénarii prospectifs différents (*Business as usual*, Techno-solutionniste & Transformatif) et aboutir à des données chiffrées. Les résultats montrent l'importance d'opter pour un scénario transformatif, qui ne se contente pas de rester dans la dynamique actuelle ou de s'appuyer uniquement sur un changement de technologie mais qui propose un véritable changement dans les habitudes de mobilité à travers des mesures ambitieuses, notamment d'accompagnement des transports en commun et des modes doux. De plus, bien qu'il nécessite encore des améliorations, le modèle développé pourra alors servir d'outil d'aide à la décision pour les acteurs des mobilités en Martinique, dont certains ont déjà suivi le projet et ses résultats. Enfin, des pistes de développement intéressantes pour la SOAME ont pu être dégagées, notamment en lien avec l'activité de gestion de parking.

Paramètre	*Business as usual*	Techno-solutionniste	Transformatif
Part modale TC	18%	18%	25%
Part modale modes doux	Egale	Egale	Marche et vélo développés au sein des communes
Taux de motorisation	Augmentation tendancielle	Augmentation tendancielle	Diminution
Part électrique/ hybride des immatriculations	Tendances actuelles	27% VE 11% hybride	27% VE 11% hybride
Recharge PV autonome	10%	50%	80%
Télétravail	0%	10%	10%
Taux de remplissage des voitures	Egal (≈ 1,39)	Egal (≈ 1,39)	1,70
Part ENR dans le mix électrique	90% (scénario *Tendanciel* de l'ADEME)	93% (scénario *Avantage technologique*)	100% (scénario *Tous feux verts*)

Hypothèses principales des 3 scénarios prospectifs © Lou Valide, 2021.

Development of sustainable mobility in Martinique

Keywords: mobility, sustainability, modelling, prospective, decision-support tool

Context

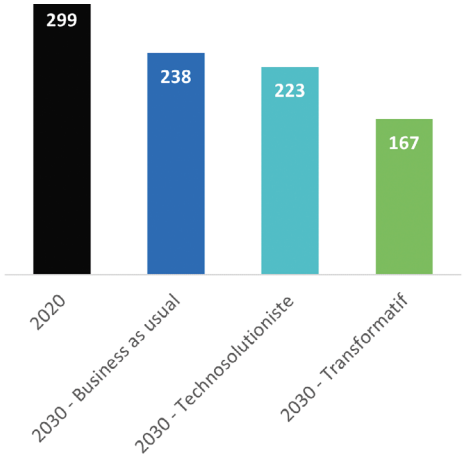
Mobility in Martinique faces environmental, social, and economic challenges today. Can the future development of mobility lead to more sustainability? The term "mobilities" refers to the transport of people and "sustainability" refers to "meeting our transport needs in an environmentally sound, socially equitable, and economically viable way". The insular aspect of Martinique makes it a kind of miniature world, a closed system particularly interesting for studying flows.

Missions and goals

The aim of the project was to carry out research, synthesis, and analysis, but also to come up with concrete development proposals for SOAME, a public interest developer in Martinique. To do this, it was necessary to draw up a review and analyse current mobility practices in Martinique, identify the main possible evolutions of these mobilities towards more sustainable practices, and attempt to quantify these evolutions. The final goal was to define the sectors to be developed for SOAME, in connection with the appearance of new practices such as the development of soft modes or the use of new technologies.

Abstract

A bibliographical search and interviews enabled me to draw up an inventory of current mobilities and their previous evolutions and to highlight the main problems of Martinique's mobilities: accessibility, cost, and environmental impact. This initial research also allowed me to identify the main possible developments and the political decisions needed to drive them. I then developed a model that projected 3 different prospective scenarios (Business as usual, Techno-solutionist & Transformative) and to come up with figures. The results show the importance of opting for a transformative scenario that is not content to remain within the current dynamics or to rely solely on technological change, but which proposes a real change in mobility habits through ambitious measures, in particular to support public transport and soft modes. Moreover, although it still requires improvements, the model developed could then serve as a decision-making tool for mobility stakeholders in Martinique, some of whom have already followed the project and its results. Finally, interesting development prospects for SOAME were identified, particularly in relation to the activity of car park management.



Émissions de gaz à effet de serre liées aux mobilités selon les scénarios (kt CO2-eq/an) © Lou Valide, 2022.

Éléments de bibliographie

RANÉLY VERGÉ-DÉPRÉ, Colette, 2019. Insularité, transports et mobilité. L'exemple de la Martinique. *Géoconfluences* [en ligne], 9 octobre 2019. Disponible sur : http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-thematiques/mobilites-flux-et-transports/articles-scientifiques/insularite-martinique (consulté le 03.05.2022).

AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (ADEME), ARTELIA, ENERDATA *et al.*, 2019. *Vers l'autonomie énergétique en zone non interconnectée en Martinique à l'horizon 2030*. S. L. : ADEME, 282 p.

TAÏLAMÉ, Joëlle (dir.), 2015. *Rapport d'exploitation de l'Enquête Ménages Déplacements Martinique 2013-2014*. Fort-de-France : EMD Martinique, ADUAM, 74 p.

Yuki YAMASHITA

Élève ingénieure double diplôme
Parcours Transport
Université de technologie de Tokyo, Japon

Promotion 2021

Mission de recherche en laboratoire réalisée à :
Université de technologie de Tokyo

Tuteur professionnel • *Organization Tutor* :
Yasuo ASAKURA, professeur

Tuteur académique • *Academic Tutor* :
Fabien LEURENT, chercheur, LVMT, École des Ponts ParisTech

La gestion du stationnement à l'époque de véhicules autonomes partagés

Mots-clés : modèle de choix comportemental, voiture autonome, système de partage, évaluation de la politique de stationnement

Contexte

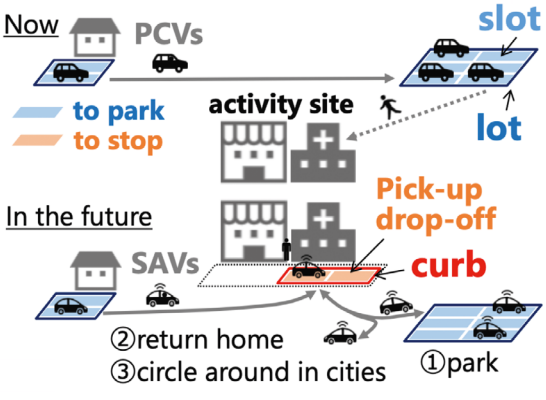
Les places de stationnement, un élément important des systèmes urbains et de transport, coûtent beaucoup de ressources aux villes pour les dépenses liées à la construction et à l'entretien. En outre, le déploiement large des véhicules autonomes et l'auto-partage sont largement considérés comme ayant un impact significatif sur le comportement de stationnement dans un avenir proche.

Missions et objectifs

La mission de ce projet de fin d'études était de développer un outil d'évaluation de la gestion du stationnement et de démontrer l'utilisation potentielle de l'outil développé. Le point innovant est que, en décrivant le comportement de stationnement et d'arrêt qui interagit avec le mouvement sur les stationnements, l'auteur a formulé un modèle de simulation des AVs qui fournit divers indicateurs pour des analyses systématiques.

Résumé

Le système de conduite automatique et l'auto-partage devraient modifier le comportement en matière de stationnement et sa demande. Il est souhaitable d'analyser les scénarii futurs et de gérer le stationnement en fonction de ces changements. Dans cette étude, nous avons développé un modèle comportemental des déménageurs et des véhicules autonomes basé sur les conditions et la dynamique des stationnements, compte tenu de l'activité et du mode de transport. Des expériences numériques utilisant des données virtuelles sont menées afin de développer une méthode d'évaluation de la gestion des stationnements et de démontrer son applicabilité. Les résultats des expériences montrent que l'introduction des véhicules autonomes partagés peut provoquer des problèmes tels qu'une augmentation de la distance totale parcourue, une diminution du revenu et une offre excessive de stationnement. Il est indiqué que ces problèmes peuvent être résolus en fixant des coûts et des capacités de stationnement de manière appropriée. Enfin, cette étude a révélé la possibilité pour la gestion du stationnement de contribuer à l'utilisation bénéfique des SAVs et au développement approprié des objectifs politiques et de l'environnement physique urbain.



Parking and stopping behavior now and in the future © Yuki Yamashita, 2021, icônes : icooon-mono.

Parking management in the era of shared autonomous vehicles

Keywords: behavioral choice model, autonomous driving, sharing system, parking policy evaluation

Context

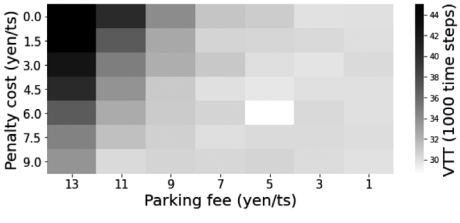
Parking spaces, an important element of urban and transportation systems, cost cities a lot of resources for construction and maintenance. Furthermore, the widespread deployment of Autonomous Vehicles and sharing systems are widely expected to significantly impact parking behavior in the near future.

Missions and goals

This study aims to (i) develop a tool for evaluating parking management and (ii) demonstrate the potential utilization of the developed tool. The innovative point of this research is that, by describing the parking and stopping behavior as it relates to movement on facilities, the author formulates an AV simulation model that provides diverse indicators for systematical analyses.

Abstract

Automated driving and car sharing are expected to change parking behavior and demand. It is worthwhile to analyze future scenarios and parking management according to these changes. In this study, we develop a behavioral model of passengers and autonomous vehicles based on parking conditions and dynamics given the activity and mode of transportation. Based on the formulated model, numerical experiments using hypothetical data are conducted to develop a parking management evaluation method and demonstrate its applicability. The results of the experiments show that the introduction of shared autonomous vehicles can cause a number of future parking issues, namely: (i) an increase in vehicle travel time, (ii) a significant decline of parking revenue, and (iii) excessive parking supply relative to demand, especially with decreased driving costs and large modal sharing of PAVs. It is indicated that these problems can be solved by setting parking costs and capacities appropriately. Finally, this study reveals the potential of parking management to contribute to the beneficial utilization of SAVs and the development of suitable policy goals and urban physical environments.



Values of VTT (Vehicle Time Traveled) for each scenario
© Yuki Yamashita, 2021.

Éléments de bibliographie

MILLARD-BALL, Adam, 2019. The autonomous vehicle parking problem. *Transport Policy*, vol. 75, pp. 99-108.

BENENSON, Itzhak, MARTENS, Karel et BIRFIR, Slava, 2008. PARKAGENT: An agent-based model of parking in the city. *Computers, Environment and Urban Systems*, octobre 2008, vol. 32, n° 6, pp. 431-439.

ZHANG, Wenwen, GUHATHAKURTA, Subhrajit, FANG, Jinqi *et al.*, 2015. Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 34-45.

Jingyu ZHANG

Élève ingénieure double diplôme
Parcours Transport
Université du Sud-Est, Nankin, Chine

Promotion 2021

Mission en entreprise réalisée à :
Artelia

Tuteur professionnel • *Organization Tutor :*
Nicolas OUDIN, directeur de pôle Études de Transport & Mobilité

Tuteur académique • *Academic Tutor :*
Fabien LEURENT, chercheur, LVMT, École des Ponts ParisTech

Étude des impacts sur la circulation des principaux chantiers monégasques

Mots-clés : chantiers, flux routiers, poids lourds, itinéraires

Contexte

Le noyau du projet est une étude de l'impact des chantiers principaux sur la circulation à Monaco. En raison de contraintes géographiques et de largeurs de voies très limitées, la circulation du trafic à Monaco est probablement plus vulnérable aux incidents. On imagine que l'influence de chantiers avec une circulation supplémentaire de camions est potentiellement négative. Dans ce cas, il est nécessaire d'estimer les impacts possibles et d'orienter les problèmes par avance. Grâce à l'outil de modélisation et de simulation, on arrive à rétablir l'état actuel et du futur.

Missions et objectifs

- Construction de la demande de trafic, des poids lourds générés par chantiers ;
- Projection des paramètres socio-économiques ;
- Calculer les impacts de voiries ;
- Simulation du modèle sur Visum ;
- Production et analyse des résultats en indicateurs et cartographie.

Résumé

On conclut que certains tronçons d'axes devenaient plus saturés et plus dégradés à l'heure de pointe du matin en scénario projet même si le volume de poids lourds (PL) des chantiers n'est pas important. Ainsi, la saturation locale peut susciter un temps de parcours augmenté localement et globalement. En conséquence, les résultats attirent une forte attention sur les axes identifiés. Autrement dit, il est probablement nécessaire de mettre certaines mesures en pratique notamment sur les points et tronçons cibles afin d'améliorer la circulation du trafic.

Par ailleurs, l'étude des impacts de chantiers sur la circulation attire aussi l'attention sur l'importance du planning de travaux. Selon la localisation des chantiers sur le secteur Est, on trouve que la densité de chantiers est la plus élevée (NCHPG, Le Bel Air, EVOS *etc.*). Donc, les flux générés par ces chantiers empruntent probablement les mêmes itinéraires et cela va augmenter fortement le taux d'occupation de la voirie locale. Puisque nous n'arrivons pas à déterminer la localisation des chantiers, mais nous pouvons optimiser le calendrier. Par exemple, pour les chantiers qui se trouvent très proches, il est approprié de ralentir l'avancement des certains chantiers moins pressés afin de réduire la tension de la voirie. D'ailleurs, une autre stratégie est d'étaler l'horaire d'ouverture des chantiers pour réduire le volume des poids-lourds en route pendant l'heure de pointe.

Impacts of principal construction sites on circulation in Monaco

Keywords: worksites, circulation, simulation, truck, routes

Context

The core of the project is a study of the impact of major construction sites on traffic in Monaco. Due to geographical constraints and very limited lane widths, traffic flow in Monaco is likely to be more vulnerable to incidents. We imagine that the influence of construction sites with additional truck traffic is potentially negative. In this case, it is necessary to estimate the possible impacts and to manage the problems in advance. Thanks to a modeling and simulation tool, we can manage the current state and the future.

Missions and goals

- *Construction of traffic demands, especially generated by trucks;*
- *Projection of socio-economic data;*
- *Calculation of impacts on routes;*
- *Simulation of model;*
- *Production and analysis of results by indicators and graphs.*

Abstract

It is concluded that certain road sections became more saturated and more degraded at the HPM in the project scenario, but the volume of HGVs on the worksites is not significant. Thus, local saturation can cause increased travel time locally and globally. The results draw strong attention to the axes identified. In other words, it is probably necessary to put certain measures into practice, particularly at the target points and sections, in order to improve the circulation of traffic.

Apart from all the progress of the study, an initiative consists of the automation of production. The Python scripts put into practice are very effective and enable the avoidance of repetitive operations on Visum and the saving of work time.

Éléments de bibliographie

KRYLATOV, Alexander, ZAKHAROV, Victor et TUOVINEN, Tero, 2020. Principles of wardrop for traffic assignment in a road network. *In*: *Optimization Models and Methods for Equilibrium Traffic Assignment*. Springer, pp. 17-43.

MCNALLY, Michael G., 2007. The four-step model. *In*: HENSHER, David A. et BUTTON, Kenneth J. (eds.). *Handbook of transport modelling*. S. L. : Emerald Publishing, pp. 35-53.

Index des diplômés

Alumni Index

ABDRAZAKOVA Angela 166
AMSELLEM Lily 138
ANDRÉ Loris 210
ARIMA Chise 224
AVELLANEDA CUFRÉ Juan Cruz 28
BAHIAOUI Oussama 212
BALTEAU Tom 182
BARTHE Maxime 214
BATY Léo 160
BEN AHMOUDA Amira 122
BERIOT O'CONNELL Juliette 226
BERTRAND Jules 204
BOULVARD Sabine 74
BOUMARCHID Abdelouahed 24
BOURDAIS Thibaut 168
BOUSLAMA Bedis 98
BOUVIER Louis 162
BOUZAABOUN Zineb 140
BREGGIA Matias 250
BURKHARD Anne 76
CANALES GARCÍA Íñigo 36
CARNEIRO TAVARES Rafael Henrique 252
CHABAL Thomas 142
CHAMAILLE Anthony 46
CHAMPAGNE Inès 78
CHAPUIS Flavien 60
CHARLOT Louis 184
CHATELAN Quentin 110
CHERITEL Côme 216
CHEVALLIER Agathe 48
CHROUD Rabeb 38
COLLIN Sasha 144
COTIL Adrien 152
CUILHÉ Benoît 128
DANIEL Florentin 130
DARMENDRAIL Laure 112
DELANNOY Paul 100
DELORME Olivier 192
DEMRI Noam 124
DE ROUX Nicolas 190
DERUYVER Victor 198
DO Hélène 102
FLESSELLES Thibault 164
GIOVAGNOLI Thomas 246
GIRAUDON Théo 146
GRAIVE Martin 154
GREDIGUI Paul 228
GREPT Alice 200
GUILLEMOT Quentin 230
GUITTON Louise 194
HAFID Anas 40
HAQUETTE Odran 50
IIDA Akihiro 254
KALFOUN Jérémy 132
KHALIL Iyes 62
LAFOND Aymeric 186

LAURET Jérémy 156
LAURON Sixtine 92
LEFEU Chloé 80
LE GOFF Josselin 104
LEVINTON Félicie 96
LINHART Julia 148
LI Yu 240
LUGINBUHL Thomas 64
MAHOU Jeffrey 170
MANSOUR Joseph 52
MARDO Alain Anthony 66
MENDES Baptiste 30
MEUNIER Thomas 206
MEZHER Karim 188
MOAL Félix 256
MONCHANIN Pierre 68
MORANE Cyril 26
MORCILO SALAS Neus 236
NAJJAR Chiheb Eddine 172
NAVARO AUBURTIN Pierre 82
NGUYEN Thi Nga 42
NOTHIAS Antoine 202
PARÉ Célia 94
PEREZ Alexandre 150
PERIER Vincent 106
PEZÉ Julia 196
PICHON Candice 108
PIERRE Maxime 44
POUPART-LAFARGE Antoine 90
POUSSARD Valentin 118
PREUMONT Laurane 126
PRIÉ Enguerrand 258
PUISTIENNE Marie 232
REUDON Eddy 208
RODET Julie 54
RUCHE Louis 88
SANTET Régis 158
SCHMITT Jean-Christophe 218
SÉGERIE Charbel-Raphaël 174
SEMAAN Christel 56
SUCHIER Louis 32
TAMURA Shun 260
THOMAS Hugo 234
TOURNADE Roland 70
VALIDE Lou 262
VANLAER Youval 176
VERDES Grégoire 120
VINCENT Lucie 58
WANTZ Antoine 72
WARDI Anissa 242
WIART Louis 34
YAMASHITA Yuki 264
YANG Changtao 244
ZHANG Jingyu 266
ZHANG Xiaotong 238
ZHAO Yunlu 248

Index des organismes

Index of organizations

Agence de l'Eau Seine-Normandie 246

Agence nationale pour la rénovation urbaine 226

Ardian 100

Argon&Co 88

Artefact 204

Artelia 40, 58, 68, 228, 266

Artelys 164

Association Notre-Dame de Montligeon 90

Banque de France 214

BNP Paribas 208

CANDRIAM 166

Centre Borelli 154

Centre d'enseignement et de recherche en Environnement atmosphérique (CEREA) 128

Centre Efficacité Énergétique des Systèmes (CES), Mines ParisTech 30

Centre international de recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED) 182

Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) 74

CERMICS 158, 162

ChangeNOW 230

Consortium Stade de France 232

Danone EDP France 112

Dodin Campenon-Bernard 56

EDF Hydro 32

EDF Lab Paris-Saclay 156

EDF Renouvelables 200

Egis Géotechnique 38

Egis Rail 36, 96

Eiffage 62

Eiffage Infrastructures 46, 70

Elioth 76

EMULITHE 34

EOLFI 238

ESTER 236

Eurazeo 192

Euryale Asset Management 186

Fortia Financial Solutions 172

Generali Insurance Asset Management 102

Gingko 21 104

Goldman Sachs Bank Europe 196

Golfe du Morbihan - Vannes agglomération 256

Holcim Innovation Center 42

ICON Technology & Process Consulting 132

Imascap 146

Ingérop Conseil et Ingénierie 72, 250, 252

INRAE 152

INRIA 142, 148, 150, 206

Inserm 144

Inspection générale des Finances 216

Institut Curie 124

Institut Europlace de Finance 168

Institut Paris Région 258

Kea & Partners 98

Kili Technology 174

Kynapse 138

Laboratoire Aguettant 194

Laboratoire de physique, ENS 130

Laboratoire Géométrie, Structure, Architecture, École nationale supérieure d'architecture Paris-Malaquais 78

Laboratoire Kawaguchi 82

Laboratoire MSSMat 118

Laboratoire Navier 82

Lafarge 66

Louis Vuitton 110

Meridiam 202

Meridiam West Africa 94

NOOCO 244

Nova Consulting 108

Nuvia Structure 26, 64

Office fédéral de l'énergie, Confédération suisse 60

Omnes Capital 198

Paris School of Economics 184, 210, 218

QuantCube Technology 190

Roland Berger 106

Safran REOSC 126

Saint-Gobain Glass 122

Saintéloc Racing 120

Setec tpi 24

SNCF Innovation et recherche 160

SOAME 262

Société Générale 140

Suez 188, 248

Terrell 50

T/E/S/S atelier d'ingénierie 28, 80

Tokyo Institute of Technology 224

Tsinghua University 240

Université de Paris 176

Université Rennes 2 234

Université de technologie de Tokyo 264

Université de Tokyo 44, 254, 260

University of California Berkeley 92

Veolia Environnement 212

VINCI 242

VINCI Construction 48, 52, 54

Yoobic 170

Index des thématiques

Amélioration continue & Lean Management 88

Aménagement et urbanisme 224, 226, 228, 230, 232, 234

Analyse et calcul économique 182, 184

Appels d'offres, financement de projets d'infrastructure 236, 238

Apprentissage statistique 138, 140, 142, 144, 146, 148, 150

Bâtiment 24, 26

Calcul de structure / éléments finis 118

Conception / prototypage 120

Conseil et Expertise 186, 188

Data Analytics 90

Data Science 92, 190

Écoconception 28, 30, 32, 34

Environnement, développement durable 240, 242, 244

Finance d'entreprise 192, 194, 196

Financement de projets 198, 200, 202

Géotechnique 36, 38, 40

Gestion de l'eau 246, 248

Ingénierie de projet 122

Innovation et conception 94

Machine Learning 204, 206, 208

Management de la production et des opérations 96

Matériaux 42, 44, 124, 126

Mécanique des fluides 128, 130, 132

Méthodes 46

Modélisation et optimisation 48, 50, 52, 54, 56, 58

Modélisation numérique et simulation 152, 154, 156, 158

Optimisation et recherche opérationnelle 160, 162, 164

Ouvrages d'art et infrastructures 60, 62, 64, 66, 68, 70, 72

Politiques publiques 210, 212, 214, 216, 218

Processus stochastiques et finance quantitative 166, 168

Stratégie 98, 100, 102, 104, 106, 108

Structures 74, 76, 78, 80, 82

Supply chain management 110, 112

Transports et logistique 250, 252, 254, 256, 258, 260, 262, 264, 266

Vision artificielle 170, 172, 174, 176

Index of subjects

Buildings 25, 27

Computer vision 171, 173, 175, 177

Consulting & Auditing 187, 189

Continuous Improvement & Lean Management 89

Corporate Finance 193, 195, 197

Data Analytics 91

Data Science 93, 191

Design / prototyping 121

Ecodesign 29, 31, 33, 35

Economic Calculus and Analysis 183, 185

Engineering structures and infrastructures 61, 63, 65, 67, 69, 71, 73

Environment, Sustainable Development 241, 243, 245

Finite element modelling 119

Fluid mechanics 129, 131, 133

Geotechnics 37, 39, 41

Innovation & design 95

Regional and Urban Planning 225, 227, 229, 231, 233, 235

Machine Learning 139, 141, 143, 145, 147, 149, 151, 205, 207, 209

Materials 43, 45, 125, 127

Methods 47

Modelling and optimization 49, 51, 53, 55, 57, 59

Numerical modelling and simulation 153, 155, 157, 159

Optimization and operations research 161, 163, 165

Project engineering 123

Project Finance 199, 201, 203

Production and operations management 97

Public Policy 211, 213, 215, 217, 219

Stochastic processes and mathematical finance 167, 169

Strategy 99, 101, 103, 105, 107, 109

Structures 75, 77, 79, 81, 83

Supply Chain Management 111, 113

Transportation and Logistics 251, 253, 255, 257, 259, 261, 263, 265, 267

Tenders, Infrastructure Project Finance 237, 239

Water Management 247, 249

Retrouvez l'École des Ponts ParisTech sur les réseaux sociaux

@EcoledesPonts @BibdesPonts

YouTube EcoledesPonts

Merci à tou.te.s celles et ceux qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage : les élèves, les équipes des départements et des directions de l'École.

Conception et réalisation • *Publishing team*
Alexia Humbert, chargée de projets d'édition, direction de la Documentation
Laetitia Bigot, chargée de mission Valorisation, direction de l'Enseignement
Cécile Blanchemanche, responsable du bureau des admissions et de la scolarité, direction de l'Enseignement
Mélissa Ferreira Da Graca, assistante à la responsable du bureau des admissions et de la scolarité, direction de l'Enseignement

Relecture de l'anglais • *English proofreading*
Clare Lavelle Long, département Langues et cultures

Impression • *Printed at*
Service reprographie

Crédit de couverture • *Cover copyright*
Accueil des 1A (2016) © Abdoulaye Konaté – École des Ponts ParisTech.

© 2023

École des Ponts ParisTech
6-8 avenue Blaise Pascal – Cité Descartes
Champs-sur-Marne – F-7-455 Marne-la-Vallée Cedex 2
ISSN : 2677-9986

L'École des Ponts ParisTech s'est engagée il y a quelques années dans la valorisation des travaux d'élèves. Depuis 2018, l'*Annuel des projets de fin d'études* illustre cette nouvelle dynamique pour les élèves-ingénieurs et offre une vision plus globale de leurs réalisations. Ce recueil propose une compilation des résumés inédits des projets de fin d'études réalisés au sein d'un organisme (une entreprise, un laboratoire, une collectivité ou une institution) par les élèves-ingénieurs lors de leur dernière année d'études.

La direction de l'Enseignement et la direction de la Documentation vous proposent ainsi un panorama des travaux réalisés, autour des grandes thématiques qui animent les départements d'enseignement de l'École. Cet *Annuel* permet une appréhension plus fine de la complexité des problématiques et enjeux contemporains, ainsi que de la qualité, de la rigueur, de la richesse et de la créativité qui caractérisent les travaux de fin d'études des élèves-ingénieurs de l'École.

Belle découverte !

In the past few years, École des Ponts ParisTech has become involved in the promotion of student work. Since 2018, the Final Year Project Yearbook *illustrates this new dynamic for engineering students and opens up a more global vision of their achievements. This compendium offers a compilation of unpublished summaries of end-of-study projects carried out within an organization (a company, a laboratory, a community or an institution) by engineering students during their final year of study.*

The Teaching Department and the Documentation Department thus offer you an overview of the work carried out, around the major themes that animate the School's teaching departments. This Yearbook *provides a more detailed understanding of the complexity of contemporary issues and challenges, as well as the quality, rigor, richness and creativity that characterize the final year work of the School's engineering students.*

We hope you enjoy discovering our students' accomplishments!

École des Ponts ParisTech
6 et 8 avenue Blaise Pascal
Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée cedex 2

www. ecoledesponts.fr

ISSN : 2677-9986