

CliMaTHs

Mathématiques et Modélisation pour le Climat, la Terre et l'Homme

Cette formation s'adresse aux élèves centraliens de Marseille, et aux élèves des autres écoles Centrale en mobilité en 3ème année.

Responsables de l'option : Jacques Liandrat, Magali Tournus

Fondateurs du projet : Aimée Boinnot, Valentin Boisard, Vianney Morain, Vincent Som-mella (Centrale Marseille-Digital.e 2020), Jacques Liandrat, Magali Tournus

Motivations

La jeune génération mobilisée. Fin 2018, le monde semble enfin prendre conscience des enjeux planétaires auxquels il doit faire face. Les jeunes descendent dans la rue et les étudiants reprochent à leurs formations d'être en décalage avec les problèmes qu'ils auront à résoudre dans leurs carrières futures. Le discours de Clément Choisine à la remise des diplômes de Centrale Nantes touche la sphère étudiante qui ne tarde pas à réagir. En septembre 2018, le texte du Manifeste Étudiant pour un Réveil Écologique est publié et est signé par plus de 30 000 étudiants français. Les étudiants en appellent aux entreprises, mais aussi aux responsables des formations : quel intérêt à détenir des engagements personnels (aller à l'école en vélo, privilégier le commerce local, etc.) si les sujets qu'ils étudient à l'école sont si éloignés de la réalité qui les attend ? La compréhension des problèmes qui menacent leur futur nourrit leurs préoccupations écologiques. Cette problématique est au centre de leur vie personnelle, et ils souhaitent qu'elle devienne également le centre de leur vie professionnelle.

Des ingénieurs éclairés. Récemment, des journalistes se sont fondés sur un article de 2009 du département d'ingénierie civile et environnementale de Berkeley pour modérer le fait que le train pollue beaucoup moins que l'avion. L'article original, qui s'intéressait au système américain, engageait à prendre en considération dans le calcul de l'évaluation du rejet carbone par passager non seulement le trajet lui-même, mais également la pollution générée par la construction des infrastructures, c'est-à-dire les gares et les rails. La remarque semble légitime, et on peut alors se demander jusqu'où aller dans la prise en compte des effets d'une activité sur la planète. Loin d'être anecdotique, ce fait journalistique soulève une question majeure : comment un ingénieur de bonne foi peut-il prendre une décision éclairée face à la multitude d'informations contradictoires qui envahissent l'espace médiatique et littéraire, parfois même brouillées par des conflits d'intérêts financiers ? Un autre exemple marquant est celui du calcul du bilan carbone, c'est-à-dire l'évaluation de la masse de carbone émise par un individu ou une organisation d'individus (entreprise, pays, etc.). Si l'on admet que ce chiffre est un bon indicateur du caractère polluant d'une organisation, comment l'évaluer de la façon la plus

”juste” possible ? Cela a-t-il du sens de discuter du bilan carbone d’une entreprise, ou doit-on le faire à l’échelle de l’individu ? Pour répondre à ce type de questions, une vision globale du problème est nécessaire. Elle fait intervenir des compétences en physique et en chimie, mais aussi en économie et en politique. Les mathématiques constituent une bonne approche pour les synthétiser. Il nous semble essentiel que les ingénieurs de demain, qui travailleront potentiellement à des postes-clés dans les entreprises, aient l’esprit critique suffisant pour identifier les limites des indicateurs, et qu’ils aient des compétences scientifiques solides pour mener leur raisonnement et prendre des décisions éclairées.

Des formations qui évoluent avec le soutien des étudiants. La prise de conscience collective que nous avons pu observer durant l’année 2019 a également touché les établissements de l’enseignement supérieur. Les écoles d’ingénieurs ont ainsi commencé à faire évoluer leurs programmes de formation pédagogique. Les administrations ont pris le relais des associations, les conférences organisées par les quelques étudiants sensibilisés s’accompagnent désormais de parcours optionnels complets, voire même de cours obligatoires sur le sujet. Ainsi, à Centrale Nantes, les étudiants et l’administration ont élaboré une option de 80h sur la thématique de l’écoconstruction. À Centrale Lyon, le lobbying étudiant, porté par l’association Mycélium, a permis de faire émerger une semaine climat avec un cycle de conférences et de tables rondes, ainsi que des ateliers participatifs de recherche de solutions. A l’INSA Lyon, le collectif Ingénieurs Engagés et son administration ont également mis au point un nouveau parcours de dernière année sur la gestion de l’eau et ses impacts socio-économiques. Enfin, à Centrale Paris et à Polytechnique, les associations X-environnement et Symposium proposent des conférences qui peuvent valoir une mention sur le diplôme. Chaque établissement a sa manière d’enseigner, ses propres thématiques et sa propre grille de compétences pour ses élèves. Néanmoins, il est temps que Centrale Marseille propose également une formation adaptée aux enjeux du monde actuel. L’inclusion du module ”Culture et Société” dans les Train’Ing 1A et 2A était une première étape nécessaire, la création d’un parcours 3A entièrement dédié au sujet en est une seconde, tout aussi importante à nos yeux.

Les mathématiques, approche universelle. Les mathématiques nous semblent être l’approche de choix pour aborder ces questions. D’une part, par essence, les mathématiques formalisent le raisonnement. Un modèle mathématique implique la clarification des axiomes supposés et des règles de déduction admissibles. D’autre part, la modélisation mathématique permet de faire communiquer des disciplines qui ont des façons différentes de représenter le monde, comme l’économie et la biologie. Une vision éclairée du monde exige le couplage entre ces différentes représentations. Nous citons la présentation des journées ”Rencontre Maths-Industrie” qui s’est tenue à l’Institut Henri Poincaré à Paris, le 12 décembre 2019 : ”Les mathématiques fournissent une approche qui permet de décrire, modéliser et simuler la complexité, à un moment où il est vital de pouvoir se représenter le monde dans un langage accessible à tous”. Enfin, la communauté mathématique française est très impliquée. On peut citer la création de l’Institut Mathématiques de la Planète Terre soutenu par le CNRS. Nous pensons qu’il faut profiter de cet élan et y inclure la nouvelle génération d’étudiants.

Globalement, la formation que nous proposons répond à un besoin de la société et promeut une approche scientifique de haut niveau.

Le programme

Le but de cette option est de former des ingénieurs qui maîtrisent la modélisation, en insistant sur l'importance (ou non) du choix du modèle (discret ou continu ? déterministe ou probabiliste ?), et sur la hiérarchie et le couplage des modèles. Nous souhaitons donner aux étudiants des outils qui leur permette d'analyser ces modèles, de prédire le comportement qualitatifs de modèles simplifiés, et de simuler de façon rigoureuse ces modèles (le schéma numérique ou l'algorithme converge-t-il, si oui, vers la solution que l'on recherche ?). Nous souhaitons aussi qu'ils acquièrent les outils de traitement des données, et d'assimilation de données. Nous insisterons aussi sur les conclusions que l'on peut tirer de ces études (critique des résultats, critique du modèle), et sur la prise de décision induites par les résultats obtenus. Ces compétences scientifiques seront développées à partir d'exemples concrets liés à la modélisation des problèmes environnementaux qui constitue l'outil principal pour aborder le futur de l'humanité. **La notion de climat est à prendre ici au sens large : nous ne nous restreindrons pas à la description des phénomènes physiques liés à la modélisation du climat, mais nous incluons dans notre approche les problèmes humains sociologiques, économiques, et écologiques.**

Pour rentrer dans le cadre demandé par Centrale Marseille, nous adoptons une organisation en trois temps de deux mois, appelés "slots" par l'école. La répartition en crédits ECTS est : Projet=3 ECTS, Tronc commun=2 ECTS, Slot=4 ECTS.

Projet (100h) Programmé une demi-journée par semaine se poursuit de septembre à Mars.

Tronc Commun (60h)

- Cours introductif (*A. Grandjean, Carbone 4, FNH*)
- Harmonisation en analyse et en statistiques (*Centrale Marseille*)
- Attestation bilan carbone (*Institut France Carbone*)
- Conférences

Slot 1 : Simulation et Optimisation (80h, Octobre/Novembre)

- Calcul scientifique (*Florence Hubert, AMU*)
- Optimisation et contrôle (*Magali Tournus, Centrale Marseille*)+ **Conférence** RTE "Equilibre offre demande dans le contexte de croissance de l'énergie renouvelable"
- Calcul Haute Performance pour la météo et le climat (*José-Ramon Herrero, Univ Barcelone et Thomas Dubos (Laboratoire de météorologie dynamique, Ecole Polytechnique)*)
- Analyse et simulation de trafic routier, opinion (*Thierry Goudon, DR INRIA, Nice*)

Slot 2 : Modèles et couplages (80h, Décembre/Janvier)

- Couplages de modèles : Economie, Ecologie et Société (*en discussion*)
- EDP en biologie : Croissance, réaction, mouvement (*G. Chiavassa, J. Liandrat et M. Tournus, Centrale Marseille*)
- L’anthropocène et ses futurs (*Equipe STEEP- INRIA*)
- Mathematical Problems in Climate Dynamics (*M. Ghil, ENS Paris*)
- Modélisation multi-agents en sciences sociales (*J. Rouchier, CNRS, Lamsade Paris*)

Slot 3 : Données et statistiques (80h, Février/Mars)

- Apprentissage statistique (*C. Pouet, Centrale Marseille + Conférence ITK "Agriculture intelligente"*)
- Valeurs extrêmes et climat (*T. Opitz (INRAE) en discussion*)
- Reconstruction de données (*J. Baccou, J. Liandrat, Centrale Marseille, IRSN*)

Articulation avec les autres options 3A de l’école Centrale Marseille.

Le Slot 1 peut intéresser des élèves de l’option FETES. Le Slot 3 peut intéresser des élèves de l’option Digital.e. Le cours Apprentissage statistique et reconstruction de données peut être mutualisé avec l’option MMEFI. Le cours Couplage de modèles-Economie-Ecologie-Société peut intéresser des élèves de l’option MMEFI.

Masters compatibles

En troisième année, Centrale Marseille offre la possibilité d’approfondir certains enseignements par la poursuite d’un master parallèle. Les masters suivants pourraient être suivis par des étudiants de CliMaThs :

- **Master CEPS** (Calcul scientifique, Équations aux dérivées partielles, Probabilités, Statistiques)
Les cours potentiellement partageables sont :
 - Slot 1 : Calcul scientifique, optimisation et contrôle, Analyse et simulation de trafic routier-opinion
 - Slot 2 : EDP en biologie, Modèle de climat
 - Slot 3 : Apprentissage statistique et reconstruction de données
- **Master DS** (Data Science)
Les cours potentiellement partageables sont :
 - Slot 3 : Apprentissage statistique et reconstruction de données, Valeurs extrêmes et climat
- **Master MASS POP** (Mathématiques Appliquées aux Sciences Sociales)
Les cours potentiellement partageables sont :
 - Slot 2 : Modélisation multi-agents en sciences sociales
- **Master en Ingénierie des Systèmes Complexes (MISC, Centrale Marseille)**
Introduction et Slot 2

Les principaux attraits de Climaths

À qui s'adresse cette formation ?

Cette formation s'adresse **non seulement** aux étudiants souhaitant mettre la réflexion sur les enjeux climatiques et environnementaux au cœur de leur formation, et n'étant pas réfractaires à l'utilisation des mathématiques à cette fin, **mais également** aux étudiants sans attrait particulier pour les questions climatiques mais souhaitant se spécialiser dans les mathématiques. Ces étudiants pourront alors remplacer les cours du Slot 2 par des cours d'un M2 de leur choix (CEPS ou Data Science).

Résumé des sondages

Un sondage a été envoyé aux entreprises partenaires de l'école (nous remercions le service "Développement et Relations Entreprises" de l'école pour son aide), aux alumni et aux élèves de Centrale Marseille afin de tester la viabilité de cette nouvelle option. En tout, nous avons obtenu les retours d'une vingtaine d'entreprises et de 200 alumni et étudiants.

Pour les entreprises, les avis concernant la formation étaient quasiment unanimes. Une formation poussée en mathématiques et la capacité d'appliquer les nombreuses notions étudiées dans n'importe quel domaine intéressent toutes les entreprises, à l'exception d'Oresys (conseil en gestion de projet). L'application des mathématiques aux secteurs de l'énergie, du climat et de la société intéresse tout le monde. Enfin, dans une moindre mesure, l'ouverture à d'autres disciplines (sciences sociales, économie, etc.) intéresse environ la moitié des entreprises.

Certaines remarques supplémentaires ont été rédigées par les entreprises concernant la formation Climaths en elle-même. En premier lieu, ce parcours constituerait un élément différenciant vis-à-vis des autres écoles d'ingénieurs, qui ne proposent pas ce genre de formation (Oresys). Les données étant de plus d'autant plus présentes, la formation proposée fait sens et trouve une utilité dans l'analyse et l'exploitation des données (OCTO). Pour finir, cela traduirait également un engagement fort de la part de l'école que personne ne prendrait sinon, au vu des tendances politiques actuelles (ST). EY (audit) considère cependant que cette formation est plus à destination des chercheurs que des ingénieurs en entreprise, puisque les débouchés et pratiques actuelles des entreprises sont éloignées de cette formation, ce que souligne d'ailleurs INEOS.

En ce qui concerne les étudiants et les alumni, nous avons recueilli 177 réponses : 39 1A, 33 2A, 26 césurés, 42 3A, 37 alumni. Dans l'ensemble, les élèves sont enthousiastes à l'idée qu'une telle option puisse ouvrir à Centrale. En effet, 95% d'entre eux considèrent qu'il est pertinent pour Centrale Marseille de développer des enseignements de mathématiques autour des enjeux climatiques, énergétiques et sociaux de demain, et qu'une formation de ce type est adaptée au cursus centralien.

D'ailleurs, 67% des alumni et 3A auraient pris l'option Climaths si elle avait été ouverte à Re : Fwd : Candidature spontanée leur époque ; 45% des 1A et 2A sondés réfléchiraient à prendre Climaths si l'option ouvrait l'année prochaine, et 24% supplémentaires de ce même groupe affirment que Climaths serait leur premier vœu d'option !

En dehors de l'aspect mathématique qui décourage la majorité des sondés, la demande est bel et bien présente : les élèves souhaitent clairement étudier plus de notions liées aux enjeux énergie/climat, à l'impact environnemental de nos activités et à une ouverture sur le monde dans leurs programmes. Les mathématiques en sont un moyen, mais rappelons que l'idéal serait que chaque option intègre des notions environnementales au sein de son programme. Deux exemples d'avis d'anciens élèves :

Antoine Dizier, promo entrante 2014, gestion de projet à l'INES : "Quel plaisir de voir un tel module voir le jour, à l'époque il fallait s'expatrier en DD pour y trouver son compte. Beau travail! Pour aller plus loin, vous pourriez même monter des cours en mode projet : libérer du temps dans l'emploi du temps pour faire travailler les groupes, s'approprier les concepts, appliquer les notions acquises."

Gaetan Wittebolle, promo entrante 2014, data analyst chez EY : "Une vraie belle opportunité que s'offre Centrale Marseille pour s'ancrer durablement sur le marché de la transition énergétique. Les grosses boîtes de conseil et notamment la nôtre sont de plus en plus à la recherche de jeunes diplômés convaincus de ce qu'ils font et avec de vraies compétences en analyse de données. Alors si en plus ils sont sensibilisés aux causes environnementales, ils pourront avoir un vrai avantage par rapport aux élèves de nos écoles cibles."

Quels débouchés après Climaths ?

Cette filière ouvre la porte à de nombreux débouchés dans le domaine de la transition énergétique et de l'analyse de données. En sondant quelques entreprises et anciens élèves avec qui nous avons pu travailler, nous avons listé les principaux débouchés du parcours Climaths. Parmi ceux qui leur paraissent les plus appropriés, nous pouvons retrouver ceux qui suivent :

- R&D dans la transition énergétique ;
- Conseil en RSE (énergie/climat, mobilité durable, biodiversité) ;
- Data scientist (pas forcément dans le domaine du climat) ;
- Consultant en projet de transformation (réduction de l'empreinte écologique d'une usine de fabrication, projet de réduction de l'empreinte carbone de l'entreprise) ;
- Bureau d'études en urbanisme, efficacité énergétique, énergie renouvelable (modélisation, prévisions de scénarios) ;
- Instituts publics ;
- Associatif ou entrepreneuriat ;
- Recherche opérationnelle et conseil en stratégie via une compréhension système ;
- Recherche et enseignement.

Ainsi, le marché semble prêt à recruter des ingénieurs centraliens formés aux mathématiques et sensibilisés aux causes environnementales. L'urgence étant de plus en plus marquée, la demande va de toute façon grandissante. Enfin, cette filière est sans nul doute attirante pour les étudiants qui cherchent à donner un sens à leur parcours.

Détails des cours

Sans aller à l'encontre de l'autonomie des enseignants-chercheurs et intervenants, nous demanderons aux enseignants une répartition équilibrée entre cours et TD/TP (50% -50%) et au moins une question relative aux problèmes climatique et environnementaux sera illustrée. Une évaluation sera demandée pour chaque cours

Plusieurs cours sont susceptibles d'intéresser un public plus large que les élèves de ce parcours. On peut envisager de les diffuser plus largement (video), en particulier au sein du groupe des écoles Centrale. En particulier, l'équipe STEEP (cours : l'anthropocène et ses futurs, Slot 2) souhaite mettre en place un MOOC relatif à ce cours. Des discussions sont en cours au sein du groupe Centrale.

Projet (100h, 3 ECTS) En groupe, les étudiants apportent une réponse aux besoins d'une entreprise ou d'un laboratoire. Propositions de projets

- Calcul du bilan Carbone de l'école Centrale Marseille
- Chauffage intelligent ([lien vers l'entreprise KoKliko](#))
- Organisation d'une question Centrale autour des problématiques environnementale et climatique
- Agriculture intelligente ([lien vers l'entreprise ITK](#))
- Optimisation du réseau électrique ([lien vers l'entreprise RTE](#))

Tronc commun(60h, 2ECTS)

- **Cours introductif** (12h) (*Alain Grandjean (Ingénieur, Carbone 4 et Fondation pour la nature et pour l'homme), et Rodolphe Meyer (Docteur en Sciences de l'Environnement et Youtubeur (Le réveilleur))*)
Présentation des enjeux écologiques, climatiques, économiques, sociétaux, politiques, de leur compréhension et des moyens possibles pour les maîtriser.
- **Harmonisation en analyse et statistique** (20h) *Guillaume Chiavassa, Jacques Lian-drat, Christophe Pouet, Magali Tournus, ECM*
Harmonisation du niveau des élèves en analyse et statistiques : le niveau à atteindre proche de celui des élèves ayant suivi les approfondissements, S8 et effectifs de mathématiques en 2a à Centrale marseille. Travail individualisé (chaque étudiant travaille en autonomie sur des documents fournis par le professeur).
- **Attestation bilan Carbone** (16h) *Institut Formation Carbone*
Grâce à ce cours, les étudiants apprendront à effectuer le bilan carbone d'une entreprise grâce à l'Institut Formation Carbone, délégué par Association Bilan Carbone, le seul organisme en France habilité à délivrer les licences d'utilisation et d'exploitation pour effectuer un bilan carbone. Un ingénieur indépendant de Carbone France sera également recruté pour des cours intermédiaires à la formation Carbone France afin d'apporter

un point de vue extérieur et objectif sur la méthode d'élaboration de cette formation. L'idée, ici, est d'initier la réflexion et le questionnement chez les étudiants par la mise en relief de pratiques différentes.

— **Conférences** (12h)

Plusieurs conférenciers ont été contactés : *A. Keller*, Limites et vulnérabilités des sociétés industrielles, *Olivier Thual*, Assimilation de données en météo...

Slot1(80h, 4ECTS)

— **Calcul scientifique** (24h, commun avec le M2 CEPS) *Florence Hubert, AMU*

On étudiera et comparera différentes discrétisations élémentaires du problème 1D aux limites $-\Delta u = f$ (différences finies, volumes finis, éléments finis). On étudiera quelques propriétés théoriques de certains schémas et on les mettra également en œuvre en TP. On abordera également la discrétisation volumes finis du problème de transport $u_t + v \cdot \nabla u = 0$ à vitesse constante. On mettra en évidence numériquement et théoriquement les propriétés de stabilité et de convergence de ces discrétisations.

— **Optimisation et contrôle** (24) *Magali Tournus, ECM*

Le but de ce cours est de savoir résoudre un problème d'optimisation en dimension finie sous contraintes, et de maîtriser les outils pour appréhender un problème d'optimisation en dimension infinie (multiplicateurs de Lagrange, méthodes de gradient, algorithmes stochastiques). Des aspects de la théorie du contrôle seront présentés.

Une **Conférence** (RTE "Equilibre offre demande dans le contexte de croissance de l'énergie renouvelable") est associée à ce cours.

— **Calcul Haute performance pour la météo et le climat** (18h) *José-Ramon Herero, Univ Barcelone et Thomas Dubos (Laboratoire de météorologie dynamique, Ecole Polytechnique)*

This lecture include geophysical fluid dynamics, hydrodynamic instabilities of vortices and stratified shear flow, geophysical turbulence, numerical methods for general circulation models, idealized applications to terrestrial and planetary circulations. Spécificités HPC.

— **Analyse et simulations de trafic routier, opinion** (18h) *Thierry Goudon, DR INRIA Nice*

Présentation de modèles en trafic routier (Follow the Leader, Lighthill-Witham-Richards) avec deux approches différentes : une approche multi-agent et une approche fluide. On abordera le contrôle du trafic en vue de la réduction d'émission de particules (stop and go waves, voitures autonomes).

Slot2(80h, 4ECTS)

- **Couplage et modèles : Economie, écologie, société** (10h) *Etienne Espagne (AFD)*
Sur la base des conférences sur ce thème (workshop 3) au trimestre IHP Mathématiques du climat et de l'environnement 2019. [lien vers la conférence](#)

- **Mathematical Problems in Climate Dynamics** (12h) *Michael Ghil, ENS*
Lecture I : Observations and planetary flow theory - Geophysical fluid dynamics. Lecture II : Atmospheric Low-frequency variability and Long-range forecasting. Lecture III : Energy balance models, paleoclimate and "tipping points". Lecture IV : Nonlinear and stochastic models-Random dynamical system. Lecture V : Advanced spectral methods-Singular-spectrum analysis et al. Lecture VI : The wind-driven ocean circulation.

- **EDP en biologie ; Croissance, réaction, mouvement** (24h) *Guillaume Chiavassa, Jacques Liandrat, Magali Tournus, ECM*

L'objectif ce cours est de présenter et d'étudier mathématiquement des modèles EDP (Equations aux Derivées Partielles) utilisés en dynamique des populations appelés équations de Reaction-Diffusion. Le terme population est à prendre ici dans un sens abstrait : on peut décrire des populations humaines, animales (moustiques, crapauds), mais aussi des populations de cellules (saines ou cancéreuses),

On étudie les comportements des modèles de façon qualitative, c'est à dire qu'en manipulant les équations, on arrive à prédire l'évolution du système. Cela vient souvent en complément d'une étude numérique qui consiste à résoudre les équations grâce à un schéma numérique implémenté sur ordinateur. L'intérêt d'une étude qualitative par rapport à une étude numérique est que cela évite d'avoir à calibrer le modèle, c'est à dire à trouver les valeurs des paramètres du modèles. En effet, si en physique les paramètres (la viscosité d'un fluide, les masses molaires) sont souvent mesurables expérimentalement, dans les modèles qui interviennent en dynamique des populations, les paramètres sont plus abstraits (le taux de mortalité d'une population, le taux d'invasion d'une population de cellules). En fonction du modèle, on peut prédire différents scénarii : la population peut s'éteindre en temps long, ou converger vers un état stable. Dans le cas où on est en présence de deux populations, l'une peut prendre le dessus sur l'autre, les deux peuvent cohabiter de façon stable en temps long, ou les deux peuvent s'annihiler.

Les applications privilégiées sont : dynamique de fronts des épidémies et pandémies, survie ou extinction d'une population en présence d'un changement climatique (déplacement des isoclines de température), impact de l'hétérogénéité génétique au sein d'une population sur sa survie.

- **L'anthropocène et ses futurs** (24h) *Equipe STEEP, INRIA Grenoble*

Le but de ce cours est de faire d'abord découvrir et comprendre la complexité, l'ampleur et l'urgence des enjeux environnementaux auxquels notre civilisation moderne est actuellement confrontée. Nous essaierons d'entrevoir à quel point, l'ensemble de crises auxquelles nous devons faire face aujourd'hui et demain sont entremêlées.

Le cours est constitué de 6 séances.

Séance 1 : État des lieux. Aperçu des enjeux environnementaux et liés (baisse des nappes phréatiques et diminution des récoltes, érosion des sols et progressions des déserts,

élévation de la température et insécurité alimentaire, diminution d'autres ressources) et de leurs conséquences (émergence d'une géopolitique de la pénurie alimentaire, lot grandissant des réfugiés environnementaux, tensions croissantes, états défailants). Limites planétaires. Séance 2 : Modèles permettant de faire des prospectives sur les évolutions environnementales et socio-économiques (tendances de croissance, d'effondrement, de stabilité, etc.). Dynamiques des systèmes. Séance 3 : Indicateurs de performances économiques, du « bien-être » d'une société, de l'environnement. Empreinte écologique. Soutenabilité. Notions d'économie écologique et d'analyse multicritères. Séance 4 : Analyse de freins à l'action : individuels, institutionnels, politiques, sociotechniques. Séance 5 : Solutions technologiques aux problèmes environnementaux – possibilités et limites. Effets rebond et induit. Le rôle et l'impact du numérique. Séance 6 : Synthèse. Limites de la solution “technologique” et enjeux socio-politiques. Quel rôle pour les chercheurs, la science ?

— **Modélisation multi-agents** (10h) *Juliette Rouchier, CNRS, Lamsade*

Utilisation de modèles multi-agents et de simulations pour montrer comment envisager de répondre aux questions de gouvernance de l'environnement et de coordination des individus en se focalisant sur les aspects économique et politique.

Slot3(80h, 4ECTS)

— **Valeurs extrêmes et climat** (24h) (Thomas Opitz (INRAE), en discussion)

Théorie des valeurs extrêmes en dimension 1 : résultats historiques et approche GEV, (Generalized Extreme Value Distributions), lois max-stable, loi de Pareto généralisée, Outils de diagnostic des données : QQ-plot, tests d'adéquation et d'homogénéité, Estimation de l'index de queue : estimateurs de Hill et de Pickands, Estimation des caractéristiques des événements rares : quantiles extrêmes, niveau de retour, période de retour, Extension à la dimension $d > 1$: dépendance spatiale des maxima.

— **Apprentissage statistique** (24h) *Christophe Pouet, ECM*

Rappel d'outils mathématiques utiles : méthode de descente de gradient, complexité algorithmique, espérance conditionnelle, à compléter selon le cursus des élèves inscrits dans l'option. Introduction aux problèmes de régression et de classification, Méthodes par arbre : arbre de régression, arbre de classification, forêt d'arbres, méthode de boosting, Méthodes des plus proches voisins en régression et en classification Support Vector Machine, Réseaux de neurones,

— **Reconstruction de données** (32h) *Jean Baccou, IRSN et Jacques Liandrat, ECM*

Reconstruction de données en statistique spatiale, Kriegerage, Méthodes à noyaux, approximation multiechelle, schémas de subdivision, ondelettes. Applications en gestion des risques et suivi de polluants.

Informations supplémentaires

- **Nombre maximum d'étudiants dans Climaths.** La formation peut accueillir au maximum 20 étudiants. Nous privilégions une dualité de profils et nous réservons :
 - 10 places pour des étudiants souhaitant essentiellement faire des maths (sélection sur le niveau en maths, les notes étant pondérées par la difficulté de certaines options, et sur la volonté affichée de faire des maths (choix des UEs, stages....))
 - 10 places pour des étudiants motivés par la thématique de Climaths avec un intérêt pour la modélisation (sélection sur la motivation et le niveau académique général)
- **Les Masters.** Nous attirons l'attention sur le fait que si les masters mentionnés plus haut peuvent être suivis par les étudiants du parcours Climaths, c'est uniquement avec le master CEPS ([voir lien](#)) que nous avons des accords d'emploi du temps. Cela signifie que suivre le master CEPS en plus de Climaths n'entraînera aucun conflit d'emplois du temps. Pour tous les autres, il y aura conflit d'emplois du temps (et on en discutera au cas par cas). De façon générale, pour tous les masters cités plus haut (incluant le master CEPS), nous proposons aux étudiants suivant un master de ne pas suivre un des 3 slots de Climaths (ou de le suivre sans avoir à le valider) afin de les alléger. Le choix du slot en question se fait après discussion entre l'étudiant et les responsables de Climaths et du master.

Les co-fondateurs de CliMaTHs

Vous avez des questions ? N'hésitez pas à nous contacter, vous trouverez ici nos coordonnées ainsi que les motivations personnelles qui nous ont poussés à ouvrir CliMaTHs.

— **Jacques Liandrat**

jacques.liandrat@centrale-marseille.fr

Enseignant chercheur à l'école Centrale de Marseille

— **Magali Tournus**

magali.tournus@centrale-marseille.fr

Enseignante chercheuse à l'école Centrale de Marseille

— **Aimée Boinnot**

aimée.boinnot@centrale-marseille.fr

J'ai participé à la création de Climaths par conviction écologique et pédagogique. Pour ma part, j'ai une orientation plutôt sciences sociales. Je m'intéresse en particulier aux problématiques de gouvernance en contexte d'incertitude et aux processus de concertation entre parties prenantes. Pour l'heure, j'explore la question de l'intégration des SHS dans les systèmes computationnels d'aide à la décision.

— **Valentin Boisard**

valentin.boisard@centrale-marseille.fr

J'ai rejoint le projet par tropisme pour l'éducation et la pédagogie, et par intérêt pour les enjeux climatiques actuels. Je travaille aujourd'hui dans la formation des personnes défavorisées, et prépare le Concours de Recrutement de Professeurs des Ecoles.

— **Vianney Morain**

vianney.morain@centrale-marseille.fr

En cherchant quelle option choisir en dernière année, rien ne me plaisait vraiment... Aucune ne semblait adaptée aux enjeux que les futurs ingénieurs auront à affronter. Il me semblait nécessaire de combler cette lacune à Centrale, c'est pourquoi j'ai voulu aider l'option Climaths à voir le jour. Je pense sérieusement qu'elle est représentative du début d'un grand changement global dans l'éducation nationale. A vous maintenant d'en tirer profit ! Pour ma part, je travaille désormais dans un laboratoire de R&D où j'accompagne la mise en place de projets urbains dans une démarche d'ACV.