



Identité scientifique 2023



Université
de Rennes



Table of Contents

1	Préambule.....	4
2	Socle commun.....	4
2.1	Exigence scientifique.....	4
2.2	Mission de formation par la recherche aux métiers de l’enseignement et de la recherche..	5
2.3	Engagement pour la recherche.....	8
2.4	Engagement pour les transitions	9
2.5	Contribution et intégration au site universitaire de Rennes	10
3	Identité des départements-Version synthétique.....	12
3.1	Droit-Economie-Management	12
3.2	Informatique	12
3.3	Mathématiques.....	13
3.4	Mécatronique	14
3.5	Sciences du sport et éducation physique	14
3.6	Sciences pour l’environnement	15
4	Identité des départements-Version complète.....	16
4.1	Droit-Economie-Management	16
4.1.1	Exigence scientifique.....	16
4.1.2	Formation par la Recherche.....	16
4.1.3	Engagement à la recherche.....	17
4.1.4	Les transitions	18
4.1.5	Thématiques de recherche	19
4.1.6	Projets emblématiques.....	20
4.2	Informatique	21
4.2.1	Positionnement.....	21
4.2.2	Projets emblématiques	22
4.3	Mathématiques.....	26
4.3.1	Positionnement scientifique de la formation	26
4.3.2	Les spécificités de l’activité d’enseignement du département de mathématiques	26
4.3.3	Positionnement scientifique et spécificités de l’activité de recherche	27
4.3.4	Parcours d’anciens élèves	Erreur ! Signet non défini.
4.3.5	Projets emblématiques.....	28
4.4	Mécatronique	33
4.4.1	Plateformes expérimentales.....	33
4.4.2	Thématiques de recherche	35
4.4.3	Projets emblématiques.....	40

4.5	Sciences du Sport et Éducation Physique (2SEP)	47
4.5.1	Positionnement.....	47
4.5.2	Projets Emblématiques	49
4.6	Sciences pour l'Environnement	54
4.6.1	Positionnement.....	54
4.6.2	Projets emblématiques	56

1 Préambule

La réflexion a mobilisé, dans le premier semestre 2023, l'ensemble des personnels de l'école à travers ses conseils (Comité de Direction, Conseil Scientifique Restreint, Départements, Conseil Scientifique, Conseil d'Administration), ses départements et ses partenaires, i.e. les unités associées (GEM, ECOBIO, Géosciences Rennes, IETR, IODE, IPR, IRISA, IRMAR, M2S, MSHB, OSUR, SATIE, VIPS2) et les établissements associés (Université de Rennes, Université Rennes 2). C'est un point d'étape de l'Ecole normale supérieure Rennes à 10 ans après la création de l'établissement (2013)¹ et au moment de son intégration dans l'Etablissement Public Expérimental de l'Université de Rennes en tant qu'établissement-composante. Elle est destinée à formaliser sa contribution scientifique à la communauté académique dans son ensemble et plus largement à la société.

L'identité scientifique de l'ENS Rennes repose sur un socle de trois fondamentaux :

- une exigence scientifique pluridisciplinaire dans les champs thématiques portés par les départements d'enseignement et de recherche. Les départements proposent des acquis scientifiques de haut niveau, couvrant un large spectre thématique.
- une formation aux métiers scientifiques volontairement tournée vers l'apprentissage précoce, continu et soutenu de la recherche. Ces acquis méthodologiques, bases de toute approche scientifique sont ainsi mobilisables dès la sortie de l'école pour entamer des études doctorales.
- une formation à l'enseignement et à la transmission des savoirs, qui propose l'obtention d'une agrégation disciplinaire, gage d'un savoir-faire large, de haut niveau dans la thématique et d'un savoir être de passeur de connaissances.

Cette identité scientifique se complète :

- par un engagement citoyen à l'appropriation d'une éthique et d'une déontologie de l'enseignement et de la recherche ;
- par des formations disciplinaires et réflexives tournées vers les transitions sociétales, numériques et environnementales.

2 Socle commun

2.1 Exigence scientifique

Un engagement de chacune et de chacun. Tous les personnels de l'école portent l'exigence scientifique par leur activité qu'ils soient enseignants, enseignants-chercheurs, chercheurs et personnel de soutien de l'école. Nous nous reconnaissons dans une exigence scientifique définie par une recherche qui (1) contribue à une connaissance originale et pertinente, (2) est réalisée avec rigueur et ouverture d'esprit dans les règles de l'éthique scientifique, (3) est évaluée par les pairs suivant des critères propres à chacune des disciplines et produit des résultats sous forme d'articles, de livres, de logiciels, de bases de données et de brevets.

Des qualités scientifiques reconnues. La qualité scientifique est illustrée notamment par la visibilité des enseignants chercheurs à l'IUF (2 membres seniors, 1 membre junior), dans les prix de l'académie des sciences (prix Montpetit) et dans les projets internationaux (1 ERC, 1 projet HFSBC) ainsi que celle des élèves régulièrement distingués comme pour le prix l'Oréal-Unesco (4 lauréates dans les 4 dernières années), résultats significatifs pour la taille de l'établissement (33 enseignants-chercheurs, 550 élèves par année).

¹ après avoir été une antenne de l'Ecole normale supérieure Cachan (1994-2013)

2.2 Mission de formation par la recherche aux métiers de l'enseignement et de la recherche

La formation par la recherche, signature des Écoles normales supérieures, prépare en premier lieu aux métiers de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (ESR). Elle apporte également des compétences scientifiques importantes aux métiers exercés en dehors de l'ESR.

La formation développe un esprit d'ouverture, des compétences d'autonomie, d'innovation, de rigueur et d'éthique. Elle engage à se confronter à des situations nouvelles pour lesquelles aucune solution n'a été proposée et, éventuellement, pour lesquelles aucune solution définitive n'est envisageable. Elle nécessite une certaine humilité devant la nouveauté, des hypothèses qui ne seront pas vérifiées, des situations expérimentales non renouvelables (ex. économie, environnement). Elle apporte la capacité à aborder des questions ambitieuses et des problèmes difficiles ainsi qu'un intérêt fort pour l'exploration de domaines inconnus (voir encadré suivant).

Un continuum entre formation et recherche guide nos dynamiques pédagogiques et scientifiques dans nos formations et fait vivre, en retour, les résultats de la science. A travers les élèves formés, il vise à intégrer, de manière lucide et pragmatique, des résultats scientifiques dans les programmes de cours que ce soit à l'université, en classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) ou dans les formations des grandes écoles. Les formations évoluent continûment pour être en phase avec les sujets porteurs sur les fronts de science. La préparation de l'agrégation participe à l'exigence scientifique dans une acquisition de bases solides ainsi qu'à la mission de former les professeurs des générations futures dans le secondaire et le supérieur.



Des parcours de formation et de recherche originaux et personnels. La pédagogie de l'ENS Rennes repose sur un suivi individuel des élèves. Les élèves sont encouragés à construire des parcours personnalisés. L'école met en œuvre des moyens concrets par les stages de recherche en France et à l'international, l'immersion dans des équipes et laboratoires dynamiques reconnus au niveau mondial, l'éventail de choix du master 2, le parrainage et le tutorat. L'ENS Rennes favorise les échanges et travaux avec d'autres disciplines.

La formation de futurs citoyens scientifiques nous engage à cultiver une approche scientifique des enjeux sociétaux, celle des élèves comme la nôtre, par nos enseignements, les ateliers-conférences inter-départements ([conferENS](#)), les journées [INTENS](#). Elle nous engage dans les interactions entre disciplines et entre départements nécessaires pour aborder des questions très fréquemment multifactorielles. Nous mobilisons notre méthodologie scientifique, notre approche rigoureuse et nos résultats pour transmettre et participer au débat. Les recherches, parcours et échanges internationaux (ex. programmes [Erasmus+](#) en Europe, [Fulbright](#) avec les Etats-Unis, [Biosantex](#) avec Inde) participent de façon essentielle à une science sans frontière.

L'objectif de diversité des élèves participe à la volonté de donner sa chance à chacune et à chacun et au point de vue qu'il est déterminant pour la recherche que tous les profils soient représentés. L'ENS Rennes participe à des actions (1) en amont en favorisant les relations avec les lycées et premiers cycles universitaires notamment dans les cordées de la réussite, (2) sur le concours d'entrée et (3) dans le cours de la scolarité par la mise en place d'allocations normaliennes indexées

(1) Promouvoir l'ouverture sociale, c'est d'abord agir en amont pour permettre à des jeunes de tous milieux sociaux de se projeter dans des études longues et sélectives, et dans des métiers liés à la recherche. Ainsi, l'école :

- participe à deux cordées de la réussite, une à Rennes et une à Brest ;
- organise chaque année depuis 2011 un stage MathC2+, une journée "Filles et maths, une équation lumineuse", organisée depuis 2014 avec les établissements partenaires du site rennais, une journée "Sciences de l'ingénieur au féminin", organisée par l'UPSTI et l'association "Elles bougent !", une journée "Le numérique : des métiers en tous genres", organisée annuellement depuis 2015 avec différents partenaires de la région Bretagne, et l'association Femmes&Sciences, avec notamment pour objectif la sensibilisation des jeunes filles à ces métiers.

C'est aussi accompagner dès la première année d'études supérieures des élèves boursiers et boursières. C'est l'ambition que nous portons en ayant créé, avec l'université de Rennes, un CPES et en proposant un internat d'excellence dans notre résidence, propice à un tutorat avec nos élèves.

(2) Le taux de boursier-ère-s parmi les candidat-e-s aux différents concours varie selon les disciplines, et est particulièrement élevé pour les concours ATS et TSI. Un léger biais en défaveur des titulaires d'une bourse est observé pour les épreuves d'admissibilités en MP, PSI et PT. Cette analyse sera toutefois à croiser avec des données sur les CSP des parents, qui peuvent donner des résultats plus nets que le critère de la bourse. Les concours cycle master semblent moins favorables aux candidat-e-s titulaires d'une bourse et ce particulièrement au moment des épreuves d'admission. Il y a un point de vigilance pour les années à venir.

Au-delà des concours type CPGE où les biais sociaux sont difficiles à contrer, l'école porte une attention particulière à la diversité sur les admissions parallèles. De plus, l'ENS Rennes a soutenu un travail sur les "Facteurs sociaux, facteurs de genre dans le recrutement des ENS". Il s'agissait notamment d'analyser quantitativement les résultats des différents concours ENS sous l'angle de la catégorie socio-professionnelle des deux parents, pour repérer d'éventuels biais sociaux, et les corriger.

(3) Soucieuse de donner les mêmes chances de réussite à tous ses élèves, l'ENS Rennes propose aux candidats étudiants et candidates étudiantes de postuler à une allocation normalienne depuis la rentrée 2020. En offrant une garantie de ressources de 1040 € par mois (indexée sur les bourses du CROUS) pour l'ensemble de sa scolarité à l'élève bénéficiaire, l'école permet ainsi à des étudiants et étudiantes non fonctionnaires-stagiaires issus de milieux modestes, d'étudier dans des conditions financières similaires à celles et ceux qui ont été admis sur concours. Cette allocation vient compléter les autres bourses ou aides qui auront été accordées à l'étudiant et à l'étudiante pour l'année universitaire.

Exemples de parcours d'élèves

Frédéric Basso (Droit-Économie-Management, promotion 2003) est professeur associé à la London School of Economics. Il a développé dans son parcours à l'ENS Rennes une approche interdisciplinaire du monde réel dans un parcours universitaire varié (droit européen (BSc), économie politique (agrégation), études organisationnelles (MSc), psychologie de la consommation (PhD). Il a également suivi une formation universitaire en analyse de données d'imagerie cérébrale (IRMF). Il s'intéresse aux questions éthiques, sociétales et politiques (santé publique et politique sociale). Ses travaux visent à appliquer, améliorer et étendre



la littérature sur la cognition incarnée pour aider à comprendre et à changer la vie économique. On peut dire que l'expression "vie économique" est large et, dans son travail, il considère divers aspects,

qu'ils soient psychologiques, sociaux ou politiques, liés à la production, à la distribution et à la consommation de biens et de services.

À ce jour, trois dimensions principales de ses recherches englobent ces aspects : 1) les questions de santé publique, 2) la consommation socialement responsable et 3) le développement de la pensée et des pratiques utopiques (changement social transformateur). À ce titre, ses recherches s'inscrivent dans le thème de recherche "santé planétaire", dont l'objectif est de développer des solutions théoriques et pratiques pour mettre en œuvre et promouvoir des pratiques plus durables afin que nous puissions vivre à l'intérieur des limites de la planète. Prix d'excellence en éducation et prix d'enseignement de la LSE (2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022). Il enseigne dans le nouveau master Earth law du département DEM de l'ENS Rennes.

Maxime Cauté (Informatique, promotion 2018) s'est forgé un parcours original en sciences cognitives complétant ses études en informatique. Il s'est appuyé sur une solide formation en informatique et un parcours personnalisé en sciences cognitives pour se lancer dans un projet scientifique ambitieux sur l'origine de l'abstraction dans l'espèce humaine. Après la découverte des sciences cognitives en L3 à l'occasion d'un stage sur la transcription automatique du chant des canaris, il a poursuivi en M1 par des stages sur le traitement de l'imagerie cérébrale, sur l'utilisation de réseaux de neurones pour résoudre des tâches de



recherche opérationnelle et sur les biais entre les humains et les différents types de réseaux de neurones. Il s'intéresse aux problématiques de langage et d'évolution, thématique sur laquelle il réalise actuellement sa thèse au Collège de France sous la direction de Stanislas Dehaene sur la singularité des mécanismes du langage chez l'humain au travers de la sémantique formelle.

Christy Ann Petit (Droit-Economie-Management, promotion 2014) est professeure adjointe à la School of Law and Government de la Dublin City University (DCU) et directrice adjointe de l'Institut Brexit de la DCU. Elle est actuellement coordinatrice du module "EU Banking and Finance Law & Policy after NGEU", un module Jean Monnet financé par une subvention Erasmus + de la Commission européenne (2022-2025). Ses intérêts de recherche couvrent le droit de l'UE, la supervision et la réglementation financières, le droit de l'Union bancaire, l'Union économique et monétaire et les banques centrales.



Auparavant, elle a été associée de recherche à la Florence School of Banking & Finance de l'Institut universitaire européen (IUE) pendant deux ans. Elle a soutenu sa thèse de doctorat sur "Un système intégré de supervision bancaire dans l'Union bancaire" au département de droit de l'IUE. Elle est diplômée de l'École normale supérieure de droit, d'économie et de commerce en France, et du Collège d'Europe en droit européen (LLM). Christy Ann a été stagiaire à la Banque centrale européenne, à la Cour de justice de l'Union européenne (Tribunal) et au Centre de recherche des écoles militaires de Saint-Cyr.

Edouard Dossetto (Mécatronique, promotion 2014) est également Ingénieur du Corps des Ponts, des Eaux et Forêts. Il a été reçu major du concours 2013 de l'agrégation de Sciences Industrielles de l'Ingénieur (Mécanique), avant de réaliser un Master Energies Renouvelables et une formation en "core business skills" dans le cadre du "Stanford Ignite Program". Il a soutenu une thèse de doctorat sur le thème de la "Macrodynamique de la transition : robustesse, vélocité de la monnaie



et politiques publiques", sous la direction de Christophe Chorro, maître de conférence en finance quantitative, et de Gaël Giraud, directeur de recherche CNRS et ancien chef économiste de l'Agence Française de Développement. En 2019, avec la bourse de mobilité doctorale "Alliance" et à l'invitation

de Joseph E. Stiglitz, il a mené des recherches sur l'économie et le climat à Columbia University pendant 3 mois. Il a participé en tant qu'adjoint chef de bureau à la COP25 et COP26 au sein de la Direction des Affaires Européennes et Internationales du Ministère de la Transition Ecologique avant d'entrer au service de la Première Ministre au Secrétariat des Affaires Européennes durant la Présidence Française de l'Union Européenne.

Elise Goujard (Mathématiques, promotion 2007) est maîtresse de conférences en géométrie à l'université de Bordeaux, au sein de l'Institut de mathématiques de Bordeaux. Elle est spécialiste des problèmes de comptage sur des surfaces plates et leurs espaces de modules. Ses travaux contribuent à l'étude des trajectoires périodiques dans les billards polygonaux, par le calcul des constantes de Siegel-Veech et des volumes de Masur-Veech des surfaces plates associées. Lauréate de l'IUF Junior depuis 2022. Médaille de bronze du CNRS 2023. Elle était élève dans le département de mathématiques de l'ENS Rennes de 2007 à 2011 et a fait sa thèse à l'IRMAR de 2011 à 2014 sous la direction d'Anton Zorich.



Caroline Martin (Sciences du Sport et Éducation Physique, promotion 2014). Ancienne joueuse de haut niveau, numéro 7 française chez les 17-18 ans, Caroline Martin est spécialiste de l'analyse du mouvement au tennis (docteur en STAPS : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives) au sein du laboratoire M2S. Elle travaille notamment sur l'optimisation du service au tennis et cherche à identifier les mouvements les moins traumatisants pour les articulations et les plus performants au niveau de la vitesse de la balle. Elle a été lauréate de la bourse L'Oréal France-Unesco.



Gabriel Peyré (Mathématiques, promotion 1999) est directeur de recherche au CNRS en sciences des données. Il a introduit et développé des notions de statistique, d'analyse et de géométrie pour résoudre des questions mathématiques d'imagerie, d'analyse numérique et d'intelligence artificielle. Lauréat de l'ERC Starting Grant SIGMA-Vision en 2010 et de l'ERC Consolidator Grant Grant Noria 2016. Prix Blaise Pascal de l'Académie des Sciences en 2017, médaille d'argent du CNRS en 2021. Conférencier au Congrès européen des mathématiques en 2022. Il était élève dans le département de mathématiques de l'ENS Rennes de 1999 à 2003.



2.3 Engagement pour la recherche

Un environnement scientifique stimulant dans le partenariat avec les unités de recherche du site de Rennes (CDA, CREAD, IETR, IODE, IPR, IRISA, IRMAR, M2S, MSHB, OSUR, VIPS2) et sur d'autres sites (GEM, SATIE). Les enseignants-chercheurs bénéficient de l'environnement scientifique et technique des unités et y apportent leur dynamisme. Ils participent à l'animation des unités dans leur vie de chercheur au quotidien au même titre que les collègues des autres établissements. Avec les ingénieurs et techniciens, ils contribuent à porter des plateformes technologiques pour la recherche (ex. SUNI, Immerstar). Ils s'impliquent régulièrement dans les responsabilités des unités (ex. direction d'équipe). Leur positionnement est le fruit d'un dialogue permanent entre les unités et les départements de l'ENS Rennes. La stratégie scientifique de chacun des départements est décrite plus précisément dans les sections.

L'engagement de l'établissement dans la recherche. L'exigence scientifique nécessite une organisation adaptée qui permette de développer une activité scientifique dans un environnement porteur, ouvert, créatif et critique. L'ensemble de l'école est mobilisé pour promouvoir la qualité des

recherches qui y sont menées. Des moyens spécifiques y sont dédiés avec des financements directs², l'accompagnement des jeunes chercheurs³ et une articulation privilégiée de la formation avec la recherche. Les instances de l'ENS Rennes (présidence, départements, conseil scientifique) font évoluer régulièrement les structures et dispositifs d'accompagnement, l'excellence scientifique n'étant pas un acquis mais une dynamique à entretenir et à renouveler. L'un des projets est la mise en place de dispositifs d'accompagnement pour la recherche de ressources propres et particulièrement pour la participation au pilier 1 d'Horizon Europe ("Excellent Science").

L'engagement pour la formation et pour la recherche est un engagement de l'ensemble des personnels enseignants-chercheurs, enseignants, ingénieurs, administratifs et techniques (Figure ci-après). Chacun et chacune participe par ses fonctions et par son implication dans la vie de l'établissement à ses missions, et, de ce fait, est pleinement légitime pour se prévaloir des résultats scientifiques autant que des qualités de la formation.



Figure : Les personnels portent tous par leur engagement et chacun par leurs missions propres l'exigence scientifique, la formation par la recherche, l'engagement pour la recherche et la contribution aux transitions, socle de l'identité scientifique de l'École normale supérieure de Rennes. En attente du trombinoscope en cours de réalisation, cette photo prise le 18 septembre 2018 représente le personnel administratif de l'école et illustre son importance au quotidien dans l'ensemble des missions de l'école.

2.4 Engagement pour les transitions

L'ENS Rennes est particulièrement investie sur les grands défis de notre temps autour des transitions numériques, environnementales et sociétales en cohérence avec l'Université de Rennes, l'Université Rennes 2 et ses autres partenaires. **Notre engagement repose sur notre recherche.** Dans sa dimension fondamentale, notre activité de recherche vise à construire et faire évoluer nos disciplines en les structurant autour de concepts centraux qui forment le socle des connaissances et des avancées scientifiques. **Notre engagement contribue à chacune des transitions et à leurs interactions.**

Cette recherche est aussi en prise avec la société et le monde, cherchant à résoudre les problèmes concrets qui s'y posent aujourd'hui dans une démarche renouvelée où le progrès scientifique est éclairé par l'objectif d'une transition vers une société durable et équitable dans l'idéal forgé par les objectifs de développement durable (ODD). Cet esprit des transitions se décline dans une recherche collaborative avec la société à diverses échelles en y incluant les échelles territoriales de la Métropole

² soutien de base, compléments pour les bourses de thèse régionales-ARED, normaliens réalisant leur thèse dans l'établissement avec des financements CDSN, mise à disposition de locaux et de moyens expérimentaux, invitation de collègues étrangers.

³ les maîtres de Conférences et agrégés préparateurs effectuent un service réduit de 128h les trois premières années. Les Agrégés Préparateurs effectuent un service réduit de 150h les 6 années suivantes.

de Rennes dans l'idée de la fabrique des territoires et de la région Bretagne pour laquelle *"Il ne s'agit pas de planifier l'avenir, ce que l'accélération du temps rend de plus en plus vain, mais de l'éclairer, de le comprendre, d'en favoriser la connaissance et de prévenir ou anticiper au mieux les conséquences et opportunités des mutations en cours"* ([SRADDET](#), BreizhCop, 2019).

Nous sommes investis sur **chacune des transitions** sociétale, environnementale et numérique illustrées ci-après par quelques exemples :

- *Transition sociétale* : contributions au sport et à l'activité physique, aux recherches pour les faciliter et au développement de leurs capacités pour réduire les discriminations et renforcer les solidarités.
- *Transition environnementale* : conception de réseaux d'énergie intelligents multi-acteurs distribués (smart grids) pour la transition énergétique, éco-conception de capteurs, impact des changements climatiques sur la biodiversité et sur les ressources en eau.
- *Transition numérique* : développement de méthodes formelles pour renforcer la sûreté et la sécurité des systèmes informatiques, développement de techniques mêlant logique et apprentissage pour construire des systèmes multi-agents plus explicables.

Nous portons une attention particulière aux **interactions entre transitions** et aux recherches aux interfaces nécessitant des compétences multiples que facilite une proximité entre des champs disciplinaires différents (ex. sciences du sport & mécatronique, sciences de la vie & sciences humaines et sociales) et une pratique de l'interdisciplinarité (ex. collège Hubert Curien, PhDTrack). Nous donnons quelques exemples d'interactions entre transitions :

- *Contribution de la transition numérique à la transition sociétale* : apport des nouvelles technologies au service de l'humain notamment dans l'étude des interactions humain-systèmes au service de la prédiction des Troubles Musculosquelettiques (TMS), le développement de microsystemes et de microcapteurs adaptés au suivi de l'activité physique et de l'environnement,
- *Contribution de la transition numérique à la transition environnementale* : maîtrise de la consommation énergétique et de l'impact environnemental des grandes infrastructures numériques, dérivation rigoureuse d'équations aux dérivées partielles stochastiques pour décrire le comportement des grandes échelles d'écoulements turbulent dans les circulations océaniques,
- *Contribution de la transition sociétale à la transition environnementale* : apport des sciences juridiques à la transition environnementale (parcours Earth Law), conceptualisation des dispositifs pédagogiques favorables à une éducation environnementale en Education Physique et Sportive notamment sur les Aires Marines Educatives.

2.5 Contribution et intégration au site universitaire de Rennes

La stratégie de l'ENS Rennes est pleinement intégrée au projet de structuration du site rennais avec l'Université de Rennes et ses partenaires, particulièrement l'Université Rennes 2. L'ENS Rennes se projette au sein d'une grande université de recherche reconnue internationalement grâce à l'excellence du recrutement de ses personnels, la capacité à attirer sur le site rennais des élèves se destinant à la recherche, l'exigence de sa formation et sa vocation affirmée à former des chercheurs. Elle contribue à porter l'ambition de l'Université de Rennes et ses partenaires comme explicitée dans le volet Innovation/Recherche du plan stratégique de l'Université de Rennes (2022-2027) :

"L'Université de Rennes est un nouvel établissement pluridisciplinaire devant être créé au 1^{er} janvier 2023 par six institutions fondatrices : l'École des hautes études en santé publique (EHESP), l'École nationale supérieure de chimie de Rennes (ENSCR), l'École normale supérieure

*de Rennes (ENS Rennes), Sciences Po Rennes (IEP Rennes), l'INSA de Rennes, et l'Université de Rennes 1. Ensemble, et avec le concours et le soutien des acteurs majeurs du site rennais d'enseignement supérieur et de recherche, elles poursuivent l'**ambition de relever les grands défis sociétaux d'un monde en transition, en particulier dans les domaines de l'environnement, du numérique et de la santé globale**. C'est en lien étroit avec les organismes nationaux de recherche présents sur le site rennais (CNRS, INRAE, Inria, Inserm) que l'Université de Rennes entend assumer une **responsabilité d'université intensive de recherche**."*

Dans ce sens, l'ENS Rennes poursuit son rapprochement scientifique avec les laboratoires rennais (IETR, IODE, IPR, IRISA, IRMAR, M2S, OSUR, VIPS2) grâce à une politique volontariste de recrutement d'enseignants chercheurs. L'ENS Rennes a par ailleurs une volonté claire de rapatrier progressivement ses activités scientifiques sur Rennes en encourageant le rattachement de ses enseignants-chercheurs en poste aux unités du site. L'ENS Rennes s'implique dans les unités par les enseignants-chercheurs qui travaillent dans ses unités et aussi par les élèves qui poursuivent en thèse sur le site.

L'école apporte la spécificité d'une formation tournée vers la recherche dès la licence 3 comme moteur de la formation par la recherche sur le site au bénéfice de l'ensemble de la communauté académique. A ce titre, dix à quinze étudiants s'engagent chaque année sur le site dans une thèse dans les laboratoires associés principalement. Ils sont donc autour d'une quarantaine sur le site de Rennes. La moitié d'entre eux (7-8) bénéficient d'un Contrat Doctoral Spécifique Normalien (CDSN) et apportent ainsi des moyens supplémentaires à la dynamique scientifique du site. Ce nombre devrait augmenter, la convention signée avec le ministère autorisant jusqu'à 16 CDSN sur le site. Globalement, les élèves sont en moyenne 70 par an à s'engager dans une thèse, pour moitié financés par des CDSN. Comme ceux qui les ont précédés, ils sont appelés à être demain des acteurs majeurs de la science et de la société de demain.

3 Identité des départements-Version synthétique

Dans cette section, nous présentons une synthèse par département. Elle est complétée par la version complète dans la section suivante.

3.1 Droit-Economie-Management

Une évolution significative du département DEM, de ses maquettes, de ses partenariats, de sa pédagogie, notamment avec la création du parcours recherche “Earth law” est en cours de réalisation pour accompagner le nouveau diplôme de l’ENS Rennes, l’évolution de la recherche et de l’action publique (du global à l’Anthropocène). Plus en phase avec la société, en faisant des élèves du département des “acteurs” de leurs formations, le département se veut être le miroir des évolutions du monde de la recherche et du monde politique. Les formations du département se définissent par :

1. une formation d’excellence scientifique singulière car recouvrant 3 champs interdisciplinaires (Droit, Économie, Management), auxquels s’ajoute désormais des éléments de transdisciplinarité (Écologie/Sciences de la terre) ;
2. s’y ajoutent la formation à 3 pratiques professionnelles de la fonction publique (agrégation, magistrature, fonction publique supérieure) via, soit un apprentissage pédagogique, soit à l’appui d’enseignements à la recherche par la recherche ;
3. un engagement et des pratiques de recherche caractérisés par une immersion précoce et intense dans ce domaine avec le “tronc commun recherche” pour tous les élèves de l’ENS (participation à des recherches collectives, clinique du droit, etc.) ;
4. une formation par la mise en situation, tant dans les domaines concernés par la transition que dans les domaines des pratiques professionnelles.

Les membres du département mènent des recherches avancées dans des domaines variés comprenant l’amélioration du management des situations risquées, le droit des sociétés et des marchés financiers ainsi que le droit de la terre. Ils sont rattachés à l’UMR IODE (Institut de l’Ouest : Droit et Europe, Rennes), le Centre de droit des Affaires (CDA, Rennes), le GREGOR (Groupe de recherche sur le risque, l’information et la décision, Paris). Deux d’entre eux sont au surplus membres de la chaire Risques de l’IAE de Paris Sorbonne business school.

Formation et recherche bénéficient de l’écosystème porteur de la Maison des Sciences de l’Homme en Bretagne (MSHB) ainsi que du Réseau national des Maison des Sciences de l’Homme (RnMSH) à l’échelle nationale, des associations (Intérêt à agir, le lierre), des ministères (MAE, Justice, Économie), de grandes entreprises et de l’école doctorale internationale en droit et économie (European Doctorate in Law and Economics) en relation avec l’Université de Bologne (Italie), l’Université de Hambourg (Allemagne), et l’Université Erasmus de Rotterdam (Pays-Bas).

3.2 Informatique

Le département informatique de l’ENS Rennes participe au développement de l’informatique à haut niveau par la formation de futurs chercheurs et enseignants. Forts d’une vision large de l’informatique et de connaissances pointues dans leur discipline, nos élèves sont à même de participer au développement et à la transmission de l’informatique dans tous ses aspects, fondamentaux et appliqués, théoriques et pratiques. Le département forme ses élèves à la recherche par la recherche, en s’appuyant à la fois sur les membres du département et sur tout l’écosystème rennais de recherche en informatique. Nos élèves peuvent développer leurs projets de carrière dans toute la largeur thématique de la recherche en informatique et à ses interfaces. Pour ne citer que quelques exemples, ils se spécialisent en architecture des ordinateurs, méthodes formelles, apprentissage automatique, interaction humain-machine, réseaux et systèmes distribués. Plus de 80% poursuivent en thèse.

La spécialisation choisie par chaque élève se construit sur un tronc commun exigeant, couvrant tout le spectre de l'agrégation en informatique, et sur des formations transversales ouvertes sur un monde en changement. Nos élèves sont bien formés aux enjeux environnementaux présents et à venir de l'informatique. Des cours de pédagogie comprenant des interventions pratiques ainsi que des formations à la médiation scientifique participent également à leur ouverture à la société.

Les membres du département mènent des recherches de pointe dans de nombreux domaines de l'informatique, au sein de l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA), unité mixte de recherche qui regroupe plus de 600 chercheurs en informatique principalement sur le site de Rennes. Les dynamiques scientifiques sont également en grande partie partagées et co-portées avec Inria. Les enseignants-chercheurs du département sont reconnus à l'échelle internationale pour leur expertise et publient régulièrement des articles dans les conférences et revues scientifiques les plus prestigieuses. Leurs recherches couvrent des domaines tels que la sûreté et la sécurité informatique, l'intelligence artificielle, la modélisation et la simulation de systèmes distribués, ou encore l'architecture matérielle des ordinateurs.

Ces recherches se caractérisent par un fort impact potentiel sur le monde et sur la société. Les avancées sur ces domaines sont essentielles pour comprendre, prédire et améliorer les systèmes complexes qui composent nos sociétés modernes. Cela permet d'optimiser l'usage de ces systèmes, d'identifier leurs vulnérabilités pour les protéger, ou encore de concevoir des systèmes plus efficaces énergétiquement, en adéquation avec les défis de notre siècle.

3.3 Mathématiques

Le département de mathématiques assure une formation de haut niveau en mathématiques, visant la compétence pour la poursuite en thèse : des bases solides sur un spectre large, de l'autonomie dans l'apprentissage, du savoir-faire à l'oral, de la pluridisciplinarité (doubles cursus mathématiques-physique, mathématiques-informatique). Tous les élèves sont suivis individuellement. Chaque élève a au moins 2 entretiens individuels par an avec son responsable pédagogique. 97% des élèves réussissent à l'agrégation et 95% des élèves poursuivent en thèse.

L'activité d'enseignement est marquée par une étroite collaboration avec les UFR de mathématiques et de Sciences et Propriétés de la Matière de l'Université de Rennes, et le département d'Informatique de l'école. Le recrutement est sélectif, majoritairement en CPGE mais divers géographiquement et socialement.

L'activité de recherche se fait dans le cadre de l'Institut de mathématiques de Rennes (IRMAR), unité mixte de recherche de mathématique regroupant presque tous les mathématiciens (environ 240) des établissements de l'agglomération rennaise. L'activité de recherche du département est menée par une équipe mixte, comportant des enseignants-chercheurs de l'ENS, mais aussi des chercheurs CNRS/Inria et des enseignants-chercheurs extérieurs, qui s'impliquent dans l'école.

L'essentiel du spectre des mathématiques y est représenté (aléatoire, analyse, algèbre, géométrie) pour des besoins d'enseignement, avec une concentration sur certaines thématiques (analyse, probabilités) pour favoriser les interactions de recherche et entraîner les jeunes. L'activité du département présente :

- une vraie dynamique d'équipe à l'ENS Rennes,
- des thématiques fortes : l'analyse des équations aux dérivées partielles, déterministes comme stochastiques, les probabilités, l'analyse numérique, la théorie du contrôle, l'optimisation de forme, la géométrie arithmétique effective, la théorie des représentations, la statistique,
- un séminaire hebdomadaire, orienté sur les applications des mathématiques,

- une participation importante au labex Centre Henri Lebesgue. L'école porte les Annales Henri Lebesgue, revue internationale de recherche en mathématiques créée en 2018 et désormais l'une des plus prestigieuses revues éditées en France,
- une activité de recherche soutenue et reconnue : 2 IUF, des prix (Prix SIAM Germund Dahlquist 2015 ; Prix Michel Montpetit de l'Académie des Sciences 2017 ; Prix "La Recherche" 2019, prix "Jeunes Talents L'Oréal Unesco" 2022), 2 ANR, participation à une dizaine de comités éditoriaux de journaux internationaux, dont 2 comme rédacteurs en chef.

3.4 Mécatronique

Les recherches menées au sein du département mécatronique de l'ENS Rennes sont toutes orientées vers **les nouvelles technologies au service de l'humain et de l'environnement**. Il s'agit en particulier d'imaginer et d'étudier de **nouveaux concepts** physiques de transductions et de conversion d'énergie et de **nouveaux procédés** de fabrication/micro-fabrication compatibles avec les transitions énergétiques et environnementales. Il s'agit également de développer des **modèles mathématiques** pour la co-optimisation de systèmes complexes ou pour la **simulation** des interactions humain-systèmes au service de la prédiction notamment des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS). Enfin, il s'agit de **nouvelles approches pédagogiques** pour la didactique des sciences et technologies et éducation au développement durable.

Notons que toutes ces thématiques sont adossées à une forte approche expérimentale nécessitant de développer une instrumentation spécifique et des protocoles d'essais nouveaux. Ces thématiques scientifiques sont décrites dans la version complète (ci-après) selon cinq axes :

- Microsystèmes et microcapteurs
- Transducteurs et Systèmes d'énergie soutenables complexes
- Biomécanique de l'interaction humain-systèmes
- Conception et fabrication durables
- Didactique des sciences et technologies

Ces axes sont menés dans cinq unités de recherche : le CREAD, l'IRISA, l'IETR, l'IPR, le SATIE, le GeM⁴ ; par 3 PU, 3 MCF-HDR, 3 MCF, 2 CR CNRS, 1 AGPR, 23 doctorants, 2 post-doctorants.

L'activité d'enseignement par et pour la recherche en "Sciences Pour l'ingénieur" est réalisée en collaboration avec les UFR ISTIC et SPM de l'Université de Rennes ainsi qu'avec les départements d'informatique et de mathématique de l'école.

La formation dispensée de haut niveau scientifique et technologique est originale de par son large spectre allant de la mécanique au génie mécanique, de l'électronique à l'énergie électrique, de l'informatique à la robotique sanctionnée par deux licences et un master. Originale également par l'approche pédagogique menée basée sur un enseignement par projets notamment en recherche et en pédagogique. Enfin, les questions des transitions numériques, environnementales et énergétiques y sont particulièrement présentes au travers des séminaires réguliers et des UEs dédiées tout au long de la formation. Plus de 90% de nos élèves font une thèse de doctorat.

3.5 Sciences du sport et éducation physique

La politique pluridisciplinaire de formation et de recherche au sein du département 2SEP vise à promouvoir des pratiques physiques adaptées tant aux individus auxquels elles s'adressent qu'à la société dans laquelle elles feront sens en étant des éléments de progrès humains. Les pratiques physiques deviennent les ressorts d'un engagement en faveur d'activités vertueuses et celui d'une

⁴ A noter que les équipes du SATIE et du GeM intégreront à court terme des unités rennaises : l'IETR et l'IPR respectivement.

réconciliation lucide de l'individu avec son environnement. L'objectif de 60% de poursuite en thèse (contre 40% actuellement) pour l'ensemble de la promotion (sans distinction de statut) apparaît raisonnable à horizon 2027 ; l'objectif de 90% à 100% de réussite à l'agrégation externe d'EPS demeure en parallèle.

Le département 2SEP se perçoit donc comme un acteur de la transformation à venir de la société dans le rapport à sa pratique physique. Plus précisément, dans une société de l'individu, le projet vise à construire les modalités permettant à chacun d'avoir un mode de vie actif et solidaire, critique et connecté à son environnement. La démarche vise à répondre à un double objectif, celui de favoriser l'activité physique et celui de répondre aux enjeux environnementaux. La question du rapport au corps, aux autres, et à l'environnement sont au cœur de ce double objectif dans une reconnexion à ces différentes composantes.

Les projets de recherche conduits au sein du département embrassent différents domaines scientifiques constitutifs des STAPS : les Sciences de la Vie et de la Santé comme les Sciences Humaines et Sociales. Ils sont rattachés aux deux laboratoires Mouvement, Sport, Santé (M2S) et Valeurs, Innovations, Politiques, Socialisations et Sports (VIPS²). Le département est également impliqué dans quatre mentions de Masters du site (APAS, EOPS, SNS et STAPS), adossés aux mêmes unités. Les recherches adressent les mutations du rapport de l'individu à son environnement. Elles se font au prisme de trois transitions sociales, numériques et environnementales, à l'aune des activités physiques, sportives et artistiques.

3.6 Sciences pour l'environnement

L'objectif du département est de contribuer aux transitions en apportant de nouvelles solutions face aux défis environnementaux et à l'urgence climatique. À l'ère de l'Anthropocène, les enjeux environnementaux appellent à la mobilisation de chacun, y compris des grandes écoles. Pour former de futures générations de chercheurs et de décisionnaires, l'École normale supérieure de Rennes a créé en 2022 un département de Sciences pour l'environnement. Il s'agit d'un département d'enseignement et de recherche fonctionnant, comme les autres départements, en coopération avec les établissements et organismes partenaires.

Le département s'intéresse aux questions environnementales dans une démarche liant approches "systémiques" et "quantitatives", pour améliorer notre compréhension des interactions entre l'environnement, le vivant, le climat, les activités humaines et les sociétés. Les recherches menées par le département s'inscrivent dans les unités partenaires ECOBIO et Géosciences Rennes au sein de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR). Elles concernent

- les effets des changements globaux sur les populations d'oiseaux marins et notamment sur leurs déplacements,
- l'identification des processus contrôlant le transport et la transformation des polluants dans les bassins versants, avec pour objectif le développement de méthodes de prédiction de la qualité de l'eau applicables à grande échelle,
- la recherche en mathématiques à l'interface avec les géosciences en abordant notamment l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles et les problèmes multi-échelles

Le département est impliqué dans deux formations pluri- et inter-disciplinaires : le CPES (Cycle Pluridisciplinaire d'Études Supérieures) au niveau licence et le PhD Track au niveau master, formation partagée avec l'Université de Rennes, l'Université Rennes 2 et l'Institut Agro-Rennes Angers.

4 Identité des départements-Version complète

Chacun des départements a décrit ses activités dans un format personnel. Les différentes volumétries de leur contribution traduit cette expression libre et non des différences d'importance, tous les départements étant essentiels à l'établissement.

4.1 Droit-Economie-Management

4.1.1 Identité scientifique

L'identité scientifique du département DEM réside dans la pluralité des champs disciplinaires qui s'articulent tous autour d'une relation entre modélisation abstraite et examen des objets concrets de la recherche :

- **le droit** : la discipline juridique a ceci de paradoxal oscille entre ce qu'on dénomme le "positivisme" qui ne prend en considération que l'abstraction de la règle de droit, et une approche concrète pour lequel les faits et les personnes sont les *objets* les plus importants de la science juridique. De la même façon, si le droit est souvent perçu comme un ordre de contrainte, c'est avant tout un système qui repose sur l'affirmation de principes de liberté et de prérogatives individuelles (droits de l'homme, droits des générations futures dans le cadre de la transition, etc.)
- **l'économie**, elle aussi, subit une double tension qui porte principalement sur les méthodes. D'une part, un courant positiviste postule de l'existence de *lois* économiques et/ou propose des modèles mathématisés pour décrire et prévoir les comportements macroéconomiques ou micro-économiques. D'autre part, un courant empirique, davantage porté sur l'expérimentation pratique tend à nuancer les présupposés théorie économique néoclassique.
- **le management** construit sa scientificité sur, cette fois le pluralisme des méthodes qu'il emprunte à la plupart des autres disciplines (études de cas, enquêtes sociologiques, analyse de discours, analyse quantitative, analyse de corpus...). Néanmoins, il demeure sous l'influence prédominante de l'empirisme résultant directement des pratiques des organisations articulé, cette fois, autour d'un autre dualisme ; celui, d'une part du champ des entreprises et, d'autre part, des organisations publiques.
- **l'action publique administrative et judiciaire** s'inscrit également dans cette double approche : le support, d'abord des "lois" de l'action publique (par exemple le *New public management*, *le respect des textes par le juge*) ; et, ensuite, le support nécessaire d'une démarche plus empirique (la médiation judiciaire, la gouvernance, etc.).

4.1.2 Formation par la Recherche

La formation par la recherche développe la capacité des élèves à mener des recherches rigoureuses en Économie, Droit et Management, et à en présenter les résultats de façon ordonnée et didactique. Les élèves apprennent à concevoir et à mener des projets de recherche, à analyser des données, à interpréter des résultats et à communiquer efficacement leurs conclusions. Ils acquièrent également une compréhension approfondie des enjeux économiques, juridiques et managériaux actuels. La formation par la recherche leur permet également d'acquérir des compétences en matière de rédaction d'articles scientifiques et d'organisation de colloques ainsi que de la mise en place et à la participation à des conférences scientifiques.

Les fondements du savoir. La formation par la recherche permet ainsi d'acquérir des compétences techniques et méthodologiques nécessaires pour mener des recherches rigoureuses et pour enseigner

efficacement ces matières. L'élève contribue ainsi de façon active et appliquée à la production de nouvelles connaissances, lui permettant aussi de dévoiler les fondements scientifiques des discours enseignés, passant ainsi d'un discours fondé par l'autorité à un discours fondé en raison.

La pratique de l'enseignement. La formation par la recherche en économie, droit et management permet de former des enseignants-chercheurs de haut niveau capables de transmettre des connaissances actualisées et pertinentes à leurs élèves.

La création de connaissances. La formation par la recherche permet de former des chercheurs/ses qui peuvent contribuer à l'avancement des connaissances dans leur domaine d'expertise. Elle offre aux élèves des compétences et des connaissances avancées en matière de méthodes de recherche et d'analyse, dans une perspective ouverte à l'inter- et la trans-disciplinarité.

L'élève acteur de sa formation. La formation par la recherche permet aux élèves de développer des compétences transférables telles que la résolution de problèmes, la créativité et la communication. Ces compétences leur seront utiles dans leur future carrière, que ce soit dans le domaine de la recherche ou de l'enseignement. Au sein du département DEM, ce développement de compétences, utile aux chercheurs de demain, s'appuie sur une pluralité de modes d'enseignement (en s'appuyant notamment sur la pédagogie inversée) par la recherche dans les différents parcours : outre les cours classiques et les travaux dirigés, l'enseignement par la recherche se traduit par des exercices individuels (ex. mémoires de recherche, notes de doctrine) et collectifs (ex. projets de recherche en groupes, études de cas, conférences, *peer review*, *Law clinique*, colloques, séminaires).

Stages. De plus, les élèves ont l'opportunité de réaliser des stages pour acquérir une expérience pratique de leur domaine d'études. Ils peuvent effectuer un stage de recherche dans des laboratoires de recherche, un lycée, dans des organisations du secteur public au secteur privé, en juridiction, au MEAE... Ces stages permettent aux élèves d'avoir une perspective concrète sur la façon dont les principes juridiques, économiques ou de management sont appliqués dans le monde professionnel.

L'élève est ainsi acteur de sa formation par la recherche mais aussi apprend la recherche et l'enseignement par des mises en situation.

4.1.3 Engagement à la recherche

Le département DEM est marqué par une pluralité de disciplines mais aussi par l'ouverture professionnelle (fonction publique et secteur privé) et s'inscrit donc dans un certain particularisme avec un taux de poursuite dans le doctorat inférieur à d'autres départements. Cependant, un apprentissage à la recherche singulier a été créé dans le département pour bénéficier autant aux futurs enseignants-chercheurs qui réalisent une thèse, qu'aux futurs enseignants et aux futurs hauts fonctionnaires. Même pour le travail de fonction publique, les outils fondamentaux de la recherche contribuent à fonder en raison l'action publique. Le tronc commun « recherche » réunit ainsi plusieurs modalités de sensibilisations de la recherche propre au département, mais qui sont toutes désormais valorisées dans le cadre du diplôme de l'ENS Rennes ou des maquettes par obtention de crédits ECTS. L'engagement passe ainsi par le passage d'évaluations classiques à des évaluations introduisant aux méthodes et outils de recherche :

- **Les séminaires de recherche** mis en place en 2022 à destination des élèves du parcours Earth Law avec des intervenants scientifiques ou professionnels reposent sur l'ambition d'établir, par l'échange, une plus-value relationnelle grâce à l'échange. Les moments d'échange ménagés lors de ces séminaires permettent, notamment, d'appréhender les pratiques de recherche des intervenants au-delà des thématiques ainsi que de permettre aux élèves de s'approprier et de mobiliser les outils utilisés par les chercheurs chevronnés. Les séminaires

de l'Anthropocène en partenariat avec des associations, le *Lierre* (haute fonction publique pour la transition) ou l'IODE (UMR 6363 CNRS) pour le séminaire ENSRennes IODE, par exemple, constituent des supports privilégiés de cette pédagogie originale par la recherche et pour la recherche.

- **La clinique juridique** de l'ENS Rennes présente la spécificité de proposer un mode de travail indirect avec des associations tel que "Intérêt à agir" dont l'action n'est pas tournée vers le traitement de contentieux privés, à la différence des cliniques juridiques traditionnelles mais davantage dans des projections de l'action collective, réalisée dans un cadre légal. Cette clinique permet de sensibiliser à un droit "dans la vie" et de proposer une analyse non normative de la mise en œuvre du droit et de l'économie, grâce au support appuyé des techniques des sciences sociales. Il s'agit d'établir l'effet utile du droit, son impact et de déplacer de la sorte les axes de recherche. La clinique permet aussi d'acquérir des compétences pratiques (accès à l'information, analyse de l'information et de sa pertinence etc.).
- **Research journal.** Une encyclopédie de l'Anthropocène ou un projet de journal DEM permet aux élèves de répondre à des appels à projets dans le cadre réservé d'un volet ouvert aux jeunes chercheurs. La participation à des publications scientifiques et la connaissance du fonctionnement contemporain de la recherche en libre accès devient ainsi une des modalités de sensibilisation à la recherche.
- **Le Prélab.** Le département donne la possibilité de le faire après soit le M1 soit – et c'est l'important- le M2 par un stage dans un laboratoire de recherche en France ou à l'étranger. La durée de thèse étant plus longue en droit que dans les autres disciplines, le Prélab, qui s'inscrit dans l'encadrement par le département des projets de thèses, permet ainsi d'améliorer la qualité des thèses limitées à trois années (économie-management), ainsi que de pouvoir mener à bien les thèses de droit dont la durée est plus longue. Le Prélab, qui se substitue alors à la préparation de l'agrégation, constitue le support stratégique de l'accès aux fonctions d'enseignant chercheur dans le département DEM.

4.1.4 Les transitions

La dimension juridique, économique, managériale de la transition. Le département DEM est au cœur des transition, car droit, économie et management sont des sciences de l'action. Le professeur de permaculture britannique Rob Hopkins, initiateur des "villes en transition" a défini qu'une transition est, au sens premier, un passage d'un état à un autre, un changement systémique qui entraîne de profondes recompositions spatiales. Il s'agit d'un changement complexe car il concerne tout le monde et tous les secteurs d'un espace donné (qu'il soit d'échelle locale, régionale ou mondiale). Les transitions font ainsi l'objet d'un champ de recherche autonome dans la littérature anglophone et en Europe du Nord (*Transition studies*). Il s'agit ainsi d'un champ d'études caractérisé par le mélange de sciences de l'action et d'une transdisciplinarité. En matière de transition environnementale ou sociale, celles-ci sont nécessairement transversales mais elles peuvent également être sectorielles (transition énergétique par exemple), et l'ouverture aux sciences de la nature est essentiel à l'effectivité des politiques de transition. C'est très exactement le sens de l'évolution (la transition) du département.

Les recherches aux interfaces doivent donc être privilégiées les recherches aux interfaces et les approches (éco)systémiques et interdisciplinaires. A ce titre, l'un des parcours proposés intitulé "Recherches aux interfaces" et permet aux élèves de suivre, en sus du master politiques publiques parcours Earth Law, une licence ou master dans une discipline autre (en sciences exactes ou en sciences humaines). Un élève à l'ENS Rennes (2020-2024) suit par exemple aujourd'hui un master en sciences cognitives appliquées aux sciences sociales, car il le juge essentiel pour entamer une thèse

sur les objets de la transition. Des cours sur le climat ou la biodiversité sont réalisés par le département sciences pour l'Environnement de l'ENS Rennes.

Les séminaires Science de la nature / impact et effectivité. Un séminaire de recherche sur les rapports Droit/économie/transition est organisé, pour que la recherche elle-même se mette en transition afin d'avoir un impact réel, une effectivité sociale.

Les conférences de l'Anthropocène. L'organisation du cycle de conférences dédié à l'Anthropocène par l'association UbiDEM et le département s'inscrit dans cette volonté de penser les transitions, et notamment la transition écologique, par la recherche. Il s'agit d'une volonté de développer une éthique de la recherche "impliquée" qui transcende l'opposition entre recherche fondamentale et appliquée. Et les interventions des différents chercheurs ou acteurs du monde social visent à orienter les recherches futures des élèves du département vers des choix de thèses qui répondent à la demande sociale en matière de transition écologique.

Ces dispositifs semblent porter leurs fruits car désormais toutes les thèses effectuées par des élèves de l'ENS Rennes – que ce soit en droit, en économie ou en management- sont, au moins dans une certaine mesure, relatives à la question de la transition écologique.

Enfin, cette identité scientifique est réalisée à travers un écosystème qui se fortifie : Science po Rennes, avec un grand Master PP aux 9 parcours, des partenariats avec la faculté d'économie et de droit (conventions 4 masters), le Labo CNRS IODE, la MSHB, le RnMSH, le CNRS, le Mesri la FDC, (financement de recherches auxquelles sont associés les élèves), des Ecoles doctorales internationales (European Doctorate in Law and Economics en partenariat avec l'Université de Bologne (Italie), l'Université de Hambourg (Allemagne), et l'Université Erasmus de Rotterdam (Pays-Bas)), des associations (Intérêt à agir, Le Lierre), des ministères (MAE, Justice, Économie), de grandes entreprises, la Fondation pour le droit continental, etc.

4.1.5 Thématiques de recherche

Les thématiques de recherche des membres du département sont synthétisées. Elles illustrent le large panel de compétences et d'intérêts scientifiques du département.

Laurent Dehouck s'intéresse à l'amélioration du management des situations risquées. Il cherche notamment à résoudre les problèmes liés à l'usage par les décideurs, en pratique, d'heuristiques intuitives biaisées. Ses recherches portent sur l'amélioration des pratiques de management des risques, à partir d'expériences de terrain sur les heuristiques d'appréciation des conséquences et des probabilités. Il coanime l'équipe de recherche RIO (Risques-Incertitudes-Organisation) avec Marc Lassagne et Frédéric Gautier de la Chaire Risques de l'IAE Paris-Sorbonne (anciennement axe de recherche du GREGOR, EA : 2474).

Jean-Baptiste Lenhof est maître de conférences en droit privé, chercheur dans l'unité IODE dans les domaines du droit des sociétés et des marchés financiers. Il a participé à l'équipe de recherche de la Mission Droit et Justice sur la "Responsabilité(s) des décideurs publics face à la pandémie Covid-19". Il a travaillé sur l'établissement d'un prototype de logiciel d'aide à la décision avec François Schwarzentruher dans le cadre d'un projet Hubert Curien (ENS Rennes) sur les principes pour l'édition de jugement basé sur de multiples bases de données pour établir la pertinence de l'utilisation de la théorie des graphes pour modéliser le raisonnement juridique et le transformer instantanément en langage informatique.

Gilles Lhuillier est Professeur des Universités, rattaché pour la recherche à l'UMR IODE, Membre senior de l'Institut Universitaire de France, promotion 2023. Ses activités comprennent :

- Direction de la recherche collective lauréate de l'appel à projets inter-MSH 2019-2022, "Les industries extractives face au tournant écologique : rente, stratégies, justice. Résultats en mars 2020", avec Elsa Lafay de Michaud. Ce projet réunit 22 chercheurs et un consortium de trois MSH : La MSH-B, la MSH Nord, la MSH Saclay. Lors de la journée de réflexion "[Les recherches interdisciplinaires sur les transitions écologiques et sur le changement climatique](#)" un rapport d'activité sous forme d'[entretien audio](#) (10 octobre 2022).
- Participation au colloque "[Les mines : enjeu de la transition écologique](#)" (Université de Chicago à Paris, sept. 2021)
- Participation au colloque "[Commerce transnational et industries extractives : entre singularité et pérennité d'un modèle](#)", (28 avril 2022), Organisé par le Laboratoire de Droit des Affaires et Nouvelles Technologies –UVSQ, avec José Lopez
- Participation au colloque de clôture "[Facing The Environmental Turn: The Extractive Industries In Transition](#)", (IPoh, Malaisie 24-26 août 2022).
- Soutien du MESRI pour une recherche collective sur "Earth law : ecology incorporated in goods and services -Engineering vs Law / Ecology / Natural science" avec par exemple la participation au colloque [4S](#) d'Honolulu, nov 2023.
- Co direction avec Béatrice Parance du séminaire biennuel de la cour de Cassation "[Justice environnementale: le défi de l'effectivité, Cour de Cassation](#)", cycle de colloques 2021-2022 présentation des séminaires, [séance inaugurale](#)
- CNRS MITI, Direction de la recherche collective CNRS-INHESJ 2020 "Justice environnementale : décisions fondées sur la science" Recherches Interdisciplinaires en Sécurité-Justice, en collaboration avec le Ministère de la Justice, l'ENM, l'UMR IODE.
- Co direction-2018-2023 de la recherche collective Agence Universitaire de la Francophonie "Les meilleures pratiques juridiques au service de l'acceptabilité sociale des projets miniers", impliquant 3 équipes de recherche, française et africaine (ENS Rennes, FMSH), Brésilienne (Université fédéral de Minas gerais, Brésil,) et Canadienne (Université de Laval, Canada).
- réflexion sur l'évolution des pratiques de recherche et la conception du [Fablab-lex](#) dans la "Factory of transnational law (La fabrique du droit transnational)"
- Projet Boost Europe de la Region Bretagne, "Extractive Contracts (Framing the new transnational regulations)",
- [Revue critique des contrats pétroliers et gaziers sénégalais](#)v, Ministère des affaires étrangères-Agis, , 2018,
- [Mission droit & Justice](#) , Ministère de la justice-direction de la recherche collective financée par ministère de la justice, Mission droit & Justice Lhuillier (and alii) : The training of legal professionals: towards a "global" model ?, 2017, 313 pages.

4.1.6 Projets emblématiques

Illustration : Le cas Décathlon : Le greenwashing entre Droit, Science de la nature et STS.

Résumé : Pour étudier l'effectivité de la transition écologique, une étude de cas a été élaborée : l'étiquette environnementale de Décathlon apposée sur un produit permet-t-elle vraiment aux consommateurs de choisir, dans leur acte d'achat, les produits ayant le plus faible impact environnemental ? Les règles de droit en matière d'environnement renvoyant aux sciences de la nature, seule l'étude de la co-construction droit vs. sciences -telle que les *Sciences and technologies studies* en ont souligné l'importance- permet d'apprécier l'effectivité des dispositifs d'entreprise et de constater s'il s'agit d'une réelle transition écologique ou d'un *greenwashing*.

Nature : Les élèves de Earth law ont participé à une recherche collective pour la Fondation pour le droit continental et le MESRI, puis ont retracé cette recherche par la rédaction d'un article de recherche intitulé "Le cas Décathlon : Le greenwashing entre Droit, Science de la nature et STS", en cours de soumission à la revue Droit et Société.

Implication de l'établissement : Projet de recherche encadré par Gilles Lhuillier (professeur d'université à l'ENS Rennes) et Valentin Baudoin (Post-Doctorant) financé par le MESRI dans le cadre de la recherche "Earth law". Tous les élèves du parcours Earth Law étaient engagés dans le projet, les mardis matin du 1^{er} semestre. Les enseignantes (Françoise Amélineau, Camille Vautier) et les élèves du département Sciences pour l'environnement ont apporté des précisions sur les méthodes de calcul de la note environnementale et les indicateurs environnementaux utilisés par Décathlon.

Description : Décathlon a mis en ligne une dizaine de rapports d'une centaine de pages expliquant sa méthodologie de calcul de la note environnementale et de ses engagements environnementaux. Ils ont constitué nos "données". La question de recherche qui orientait l'analyse était : cette note environnementale est-elle efficace ou constitutive d'un cas de greenwashing ? Pour y répondre, il était important d'être sans a priori sur le résultat qu'on pourrait atteindre au terme de notre étude. A l'aune de quels indicateurs environnementaux cette note est-elle calculée, c'est à dire quel type d'impact sur l'environnement par les produits de Décathlon est pris en compte dans la note ? Quelle est la cohérence de ces choix, et la transparence de la méthodologie ?

Nous avons élaboré et appliqué une méthode d'analyse des choix de normes juridiques, des choix de méthodologie de calcul de la note, des choix écologiques.

Le résultat : Les choix -notamment de méthodologies- opérés par Décathlon privent volontairement d'effectivité le dispositif de la note environnementale, par exemple en écartant des critères scientifiques communément admis (limites de la planète, cycle de l'eau, transparence des données) qui auraient été pertinents pour des biens (vêtements) particulièrement consommateurs d'eau.



Figure : note environnementale

4.2 Informatique

4.2.1 Positionnement

Le département informatique de l'ENS Rennes participe au développement de l'informatique à haut niveau par la formation de futurs chercheurs et enseignants. Forts d'une vision large de l'informatique et de connaissances pointues dans leur discipline, nos élèves sont à même de participer au développement et à la transmission de l'informatique dans tous ses aspects, fondamentaux et appliqués, théoriques et pratiques. Le département forme ses élèves à la recherche par la recherche, en s'appuyant à la fois sur les membres du département et sur tout l'écosystème rennais de recherche en informatique. Nos élèves peuvent développer leurs projets de carrière dans toute la largeur thématique de la recherche en informatique et à ses interfaces. Pour ne citer que quelques exemples, ils se spécialisent en architecture des ordinateurs, méthodes formelles, apprentissage automatique, interaction humain-machine, réseaux et systèmes distribués. Plus de 80% poursuivent en thèse.

La spécialisation choisie par chaque élève se construit sur un tronc commun exigeant, couvrant tout le spectre de l'agrégation en informatique, et sur des formations transversales ouvertes sur un monde en changement. Nos élèves sont bien formés aux enjeux environnementaux présents et à venir de

l'informatique. Des cours de pédagogie comprenant des interventions pratiques ainsi que des formations à la médiation scientifique participent également à leur ouverture à la société.

Les membres du département mènent des recherches de pointe dans de nombreux domaines de l'informatique, en synergie avec l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA), unité mixte de recherche qui regroupe plus de 600 chercheurs en informatique principalement sur le site de Rennes. Les dynamiques scientifiques sont également en grande partie partagées et co-portées avec Inria. Les enseignants-chercheurs du département sont reconnus à l'échelle internationale pour leur expertise et publient régulièrement des articles dans les conférences et revues scientifiques les plus prestigieuses. Leurs recherches couvrent des domaines tels que la sûreté et la sécurité informatique, l'intelligence artificielle, la modélisation et la simulation de systèmes distribués, ou encore l'architecture matérielle des ordinateurs.

Ces recherches se caractérisent par un fort impact potentiel sur le monde et sur la société. Les avancées sur ces domaines sont essentielles pour comprendre, prédire et améliorer les systèmes complexes qui composent nos sociétés modernes. Cela permet d'optimiser l'usage de ces systèmes, d'identifier leurs vulnérabilités pour les protéger, ou encore de concevoir des systèmes plus efficaces énergétiquement, en adéquation avec les défis de notre siècle.

4.2.2 Projets emblématiques

Systemes multi-agents

François Swartzentruber, Equipe IRISA [LogicA](#) (Logic, Games, Information, Coordination, and Applications)

En intelligence artificielle, l'un des défis majeurs est l'explicabilité : comprendre pourquoi un algorithme prend une décision. L'intelligence artificielle est une discipline à large spectre couvrant la logique (pour modéliser le raisonnement), l'algorithmique et l'apprentissage. Depuis une décennie, les techniques d'apprentissage sont impressionnantes. Malheureusement, ces systèmes sont pour la plupart des boîtes noires : on ne comprend pas bien pourquoi ils prennent telles ou telles décisions. L'enjeu est de combiner les techniques de logique et d'apprentissage pour construire des systèmes plus explicables.

Ce défi touche tous les domaines de l'intelligence artificielle, y compris les systèmes multi-agents : plusieurs robots qui collaborent dans un entrepôt pour gérer les stocks, un robot qui confectionne un objet en collaboration avec un humain, des humains et programmes qui jouent à un jeu de cartes comme Hanabi, un programme distribué sur plusieurs machines.

Le défi est de construire des systèmes multi-agents sûrs et explicables où chaque agent est capable de raisonner pour choisir la bonne action à effectuer, tout en s'adaptant à leur environnement et aux actions des autres agents. L'étude des systèmes multi-agent est un sous-domaine de l'intelligence artificielle (IA) qui repose sur des logiques spécifiques pour modéliser le raisonnement d'agents, la planification, l'algorithmique et l'apprentissage par

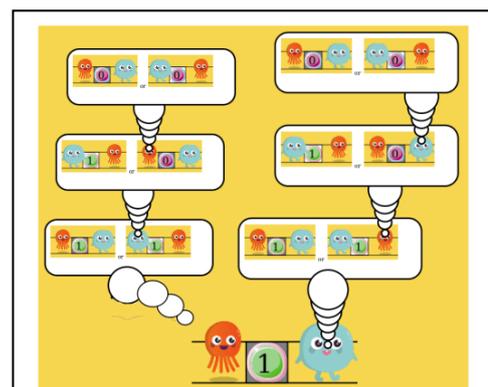


Figure : Un état linéaire fini. Le monde réel correspond à la cellule centrale 1. L'agent b imagine un monde qui correspond à la cellule droite 1 dans lequel l'agent a imagine un monde qui correspond à la cellule droite 0, etc. correspond à la cellule droite 0, etc. (HDR, F. Swartzentruber)

renforcement (pour calculer les décisions à prendre). Nous avons mené des travaux algorithmiques sur ces différents aspects.

- Le premier concerne la vérification formelle de systèmes multi-agents abstraits. Nous avons étudié plusieurs formalismes logiques pour décrire des systèmes et leurs propriétés. L'un d'eux est la logique épistémique où les agents peuvent raisonner sur des propriétés épistémiques (e.g. le robot A sait que le robot B ne sait pas que le colis X est livré). Un autre comprend les logiques stratégiques où les agents raisonnent sur l'existence de stratégies (e.g. le robot A peut faire en sorte d'apporter le colis quoique fasse le robot B). Nous avons trouvé plusieurs résultats de décidabilité et indécidabilité dans ces cadres, ainsi que des résultats de complexité théorique.
- Nous nous sommes intéressés également à un problème plus concret qu'est le Multi-Agent Path Finding (MAPF). Ce problème est la modélisation mathématique du déplacement de robots, qui doivent se coordonner pour ne pas entrer en collision. Plus précisément, nous avons étendu MAPF en supposant que les robots doivent rester connectés (par exemple, rester assez proche pour assurer une communication dans le groupe pour diffuser des informations vers une base). Nous avons établi des résultats de complexité théorique. Nous avons créé un prototype de visualisation des plans et implémenté des algorithmes implémentés efficaces.

Dans le futur, nous allons nous intéresser aux environnements non formalisés, où les agents doivent s'adapter. Ainsi, nous allons utiliser des techniques d'apprentissage par renforcement, tout en étudiant comment les logiques, notamment épistémiques, peuvent expliquer les comportements des agents.

Conception automatique d'architectures matérielles

Simon Rockiki, Equipe projet commune IRISA/Inria TARAN (Architectures matérielles spécialisées pour l'ère post loi-de-Moore)

Le jeu d'instructions (ISA pour Instruction Set Architecture) d'un processeur définit son modèle de programmation. Les développeurs de logiciels compilent leurs applications vers ce jeu d'instructions ; les concepteurs de processeurs développent des microarchitectures qui implémentent ce jeu d'instructions. De fait, l'ISA marque une frontière étanche entre le logiciel et le matériel. Cependant, plusieurs phénomènes rendent cette frontière plus poreuse :

- l'utilisation d'accélérateurs dédiés à un calcul donné est de plus en plus courante,
- l'apparition de microarchitectures plus complexes qui peuvent modifier dynamiquement le jeu d'instructions utilisé (par exemple Rosetta 2 de Apple),
- l'émergence de failles de sécurité liées au matériel qui viennent perturber l'exécution des logiciels.

Ce contexte très particulier offre de très nombreux défis de recherche à la frontière du matériel et du logiciel, avec des problématiques à l'intersection de quatre domaines : la conception assistée par ordinateur, de la compilation, de la microarchitecture et de la cybersécurité. Les besoins croissants en performance dans les architectures embarquées nécessitent de mettre au point des optimisations transverses impactant à la fois le logiciel exécuté et le matériel exécutant. La tendance actuelle nous mène vers la co-conception de langages et d'accélérateurs spécialisés à un domaine précis.

Par ailleurs, les progrès récents dans le domaine de la Synthèse de Haut-Niveau (HLS) vont rebattre les cartes, tout comme les compilateurs l'ont fait il y a quelques décennies. La HLS permet de générer un circuit matériel à partir d'une description comportementale d'un algorithme, donnée dans un

langage de plus haut niveau (typiquement du C/C++). Le département a contribué avec l'équipe TARAN (IRISA) dans cette thématique en développant un outil de pipeline spéculatif permettant de générer automatiquement des microarchitecture de processeurs. Un intérêt tout particulier est également porté sur l'aspect vérification formelle de l'architecture générée, menant à une collaboration potentielle avec les équipes Sumo et Epicure de l'IRISA.

Références :

Sûreté et sécurité des systèmes informatiques

David Baelde, Equipe IRISA Spicy (Security & Privacy)

Les systèmes informatiques nous entourent, et leur bon fonctionnement est un enjeu majeur dont dépendent des vies, de l'argent, parfois même le bon fonctionnement de nos démocraties. On s'intéresse de longue date à la sûreté des logiciels impliqués dans les systèmes dits critiques, e.g. le pilotage d'avions, le contrôle de centrales nucléaires ou de dispositifs médicaux. Aujourd'hui, la numérisation de nombreuses activités de la sphère privée et citoyenne étend cette problématique : confidentialité des conversations entre particuliers, authenticité des participants lors d'une démarche administrative, secret du vote électronique, etc. Une branche de l'informatique s'attache à offrir des garanties fortes dans toutes ces situations : les *méthodes formelles* proposent de modéliser de façon précise les systèmes et les propriétés attendues, afin de pouvoir garantir en toute rigueur que ces spécifications sont bien respectées. En pratique, des concepts informatiques variés sont conçus, étudiés et mis en œuvre pour répondre à la diversité des systèmes considérés. La vérification des systèmes étant une tâche extrêmement complexe, on conçoit, par ailleurs, des programmes capables de l'automatiser à des degrés divers.

A travers son implication dans l'équipe Spicy de l'IRISA, le département est particulièrement impliqué sur le thème de la preuve formelle de protocoles cryptographiques. Ces protocoles sont des spécifications abstraites du déroulement des communications entre différents agents souhaitant mener à bien une tâche (e.g. vérifier leurs identités, échanger une information de façon confidentielle). Les messages échangés et vérifiés durant le protocole sont calculés au moyen de diverses primitives cryptographiques (e.g. chiffrement, signature, hachage). Si la sécurité d'un protocole cryptographique repose sur son implémentation logicielle concrète, voire sur des aspects matériels, ou encore sur la sécurité des primitives cryptographiques sous-jacentes, l'étude du protocole abstrait en lui-même est déjà un défi de taille : de nombreuses erreurs de conception subtiles peuvent, en effet, se loger à ce niveau, et prouver leur absence est un défi important. On dispose aujourd'hui de plusieurs techniques permettant de modéliser les protocoles et surtout des classes générales d'attaquants, permettant ainsi de prouver formellement qu'aucun attaquant ne peut provoquer de situation indésirable dans l'utilisation d'un protocole. L'équipe Spicy participe à la conception de plusieurs de ces outils, ainsi que de leurs fondements théoriques, par exemple, la conception de logiques adaptées au raisonnement cryptographique.

Grandes infrastructures numériques

Martin Quinson, Equipe Projet Commune IRISA/Inria MYRIADS (Conception et mise en œuvre de systèmes distribués autonomes)

Il est devenu naturel d'utiliser depuis son téléphone de nombreuses applications distribuées complexes, pour échanger avec ses proches ou interagir avec les services publics et privés de notre société moderne. Les grands systèmes informatiques sous-jacents sont devenus aussi indispensables que les infrastructures de transport des biens, d'énergie ou de l'eau. La plupart de ces systèmes

agrègent de nombreux composants interconnectés, allant des sondes microscopiques jusqu'aux plus gros datacenters, en passant par les montres connectées, ordinateurs personnels et autres smartphones.

Souvent mises en œuvre pour optimiser les systèmes existants (comme le réseau électrique ou celui de transport ferroviaire), les infrastructures numériques voient leur impact environnemental augmenter de façon exponentielle en termes d'énergie ou de ressources. Maîtriser l'impact de ces infrastructures pose plusieurs défis d'importance :

- Comprendre ces infrastructures passe par la modélisation des interactions entre leurs composants, c'est-à-dire par la mise au point de modèles éprouvés expérimentalement décrivant le comportement et les performances du système.
- En utilisant ces modèles, il devient possible d'optimiser le système afin d'améliorer leur fonctionnement tout en réduisant les ressources consommées.
- L'optimisation des systèmes ne suffit pas si l'usage qui en est fait augmente de façon exponentielle. Il devient nécessaire de réfléchir à des scénarii alternatifs, permettant l'émergence d'infrastructures plus frugales pour rendre les services fondamentaux de façon efficace.

Le département contribue à cette thématique avec l'équipe Myriads (IRISA) en participant à la modélisation des infrastructures numériques. Nous sommes parmi les contributeurs principaux de l'outil SimGrid, qui permet d'étudier les performances et la correction d'infrastructures distribuées de très grande taille. Utilisé au quotidien par plusieurs équipes en charge du développement d'infrastructures numériques, cet instrument scientifique a aussi été à la base des expérimentations de près de 600 publications scientifiques de tous les continents.

4.3 Mathématiques

4.3.1 Positionnement scientifique de la formation

Le département dispense une formation intensive et de haut niveau en mathématiques, visant la compétence pour la poursuite en thèse, ses spécificités sont :

- **d'acquérir de solides connaissances dans tous les domaines des mathématiques** : obligation de suivre des cours d'algèbre, d'aléatoire, d'analyse et de géométrie, jusqu'à la fin du M1, la spécialisation ne commençant qu'en M2,
- de **s'initier à la recherche dès la L3**: groupes de lecture, conférences, stages en laboratoire, cours "de complément", **de donner des compétences pluridisciplinaires à tous** : un cours d'informatique ou de physique obligatoire, des enseignements de mathématiques appliquées (analyse numérique, programmation) par exemple aux questions environnementales,
- **Les doubles cursus maths-info et maths-physique**. Ils permettent de valider une L3 d'informatique ou de physique sur 2 ans, en parallèle des L3 et M1 de mathématiques, avec des emplois du temps aménagés ; ils sont suivis par la moitié des élèves ; ils sont une véritable plus-value, y compris en comparaison des autres ENS,
- **d'acquérir des compétences à l'oral** progressivement : 2 exposés en 1A (lecture dirigée et soutenance de stage), 4 exposés en 2A (3 groupes de lecture et soutenance stage), de très nombreux oraux blancs en préparation à l'agrégation,
- **d'acquérir progressivement de l'autonomie dans l'apprentissage** : 1 lecture dirigée et un stage en 1A, 3 groupes de lecture et un stage en 2A, recours massif aux livres en prépa-agreg, séminaire et stage en 4A.

Tous les élèves sont suivis individuellement. Chaque élève a au moins 2 entretiens individuels par an avec son responsable pédagogique. **97% des élèves réussissent à l'agrégation. 95% des élèves poursuivent en thèse.**

4.3.2 Les spécificités de l'activité d'enseignement du département de mathématiques

Les promotions comportent 35 à 40 élèves (en 1A : 10 fonctionnaires-stagiaires + 25 élèves, et à partir de la 2A : 17 fonctionnaires-stagiaires + 23 élèves).

Le recrutement est sélectif, majoritairement en CPGE mais divers géographiquement et socialement. Les fonctionnaires-stagiaires recrutés sur le concours "Maths-Physique" viennent souvent de CPGE compétitives des grandes agglomérations (ex. Paris, Lyon, Grenoble, Toulouse). Beaucoup d'élèves recrutés sur le concours "magistère" sont des éléments prometteurs de CPGE plus modestes (ex. Poitiers, Cherbourg). Quelques élèves sont issus d'un cursus L1-L2.

La formation est réalisée en **étroite collaboration avec l'UFR de mathématiques de l'Université de Rennes**, dans le cadre du magistère de mathématiques de Rennes. Nous partageons le recrutement, les enseignements et le pilotage de la formation.

La formation est également réalisée en **étroite collaboration avec les départements d'Informatique et de Mécatronique** de l'ENS Rennes **et l'UFR SPM** (Sciences et Propriétés de la Matière) de l'Université de Rennes :

- nous assurons les cours de mathématiques dans les départements d'informatique et de mécatronique (environ 200 heures équivalent TD/an),
- nous co-organisons avec le département d'Informatique le double cursus maths-info (destiné aux élèves en mathématiques) et le double cursus info-maths (destiné aux élèves en informatique). Des cours et TD de mathématiques et informatiques sont mutualisés. D'autres

sont dédoublés. Les emplois du temps des 2 départements sont donc conçus en collaboration. Nous travaillons avec la même assistante administrative,

- nous co-organisons avec l'UFR SPM le double cursus maths-physique.

Chaque année, plusieurs anciens élèves de l'École, parmi les meilleurs de leurs promotions et actuellement en doctorat dans un des établissements rennais, assurent leur mission d'enseignement dans le département, permettant ainsi une continuité dans les générations et une transmission d'informations et de conseils.

L'ENS Rennes **co-accrédite et participe au M2** de mathématiques et applications de l'Université de Rennes. Environ un tiers de nos élèves y font leur M2 recherche. Le département mène des activités de diffusion scientifique et concernant la diversité en mathématiques, organisées essentiellement par les élèves, en partenariat avec des associations (ex. MathsC2+, Animath, Femmes et maths, Math.en.Jeans).

4.3.3 Positionnement scientifique et spécificités de l'activité de recherche

L'activité de recherche se fait dans le cadre de l'Institut de mathématiques de Rennes (IRMAR), unité mixte de recherche de mathématique regroupant presque tous les mathématiciens (environ 240) des établissements de l'agglomération rennaise. L'ENS Rennes regroupe **une équipe de recherche avec des chercheurs CNRS et Inria et des Enseignants-Chercheurs (EC) extérieurs** (7 EC ENS, 5 chercheurs CNRS ou Inria, dont l'équipe Inria MINGUS, 1 PR UR2, 1 PR UR1, des doctorants et post-doctorants). **Ils s'impliquent dans l'école** pour les enseignements, le suivi et l'orientation des élèves, les conseils (CS, CA), les séminaires et les conférences.

L'essentiel du spectre des mathématiques (algèbre, géométrie, analyse, aléatoire) est représenté pour des besoins d'enseignement, **avec une concentration sur certaines thématiques** (analyse, probabilités), pour favoriser l'activité de recherche, et entraîner les plus jeunes. L'activité du département présente :

- **une vraie dynamique d'équipe à l'ENS Rennes** : articles en collaborations, thèses co-cadrées, organisation régulière de congrès/workshop/semestre thématique du labex de mathématiques Centre Henri Lebesgue (CHL) Bretagne-Pays de la Loire,
- **des thématiques fortes** : l'analyse des équations aux dérivées partielles, déterministes comme stochastiques, les probabilités, l'analyse numérique, la théorie du contrôle, l'optimisation de forme, la géométrie arithmétique effective, la théorie des représentations, la statistique,
- **un séminaire hebdomadaire**, orienté sur les applications des mathématiques,
- **une participation importante au labex entre Henri Lebesgue** L'école en est un des trois membres fondateurs et l'un des co-directeurs est membre du département. L'école porte les Annales Henri Lebesgue, revue internationale de recherche en mathématiques créée en 2018 et désormais l'une des plus prestigieuses revues éditées en France,
- **une activité de recherche soutenue et reconnue** : 2 IUF, des prix (Prix SIAM Germund Dahlquist 2015 ; Prix Michel Montpetit de l'Académie des Sciences 2017 ; Prix "La Recherche" 2019, prix "Jeunes Talents L'Oréal Unesco" 2022), 2 ANR, participation à une dizaine de comités éditoriaux de journaux internationaux, dont 2 comme rédacteurs en chef,

4.3.4 Parcours d'anciens élèves

Parcours d'anciens élèves dans le milieu académique :

En analyse

- Hélène Hivert (promo 2010), MC Centrale Lyon CPJ Inria Rennes, analyse numérique
- Gabriel Peyré (promo 199X), DR CNRS, médaille d'argent CNRS, sciences des données

En aléatoire

- Yvain Bruned (promo 2009), Warwick-Londres-Edimbourg puis PR Nancy
- Olivier Garet (promo 1995), PR Nancy
- Camille Male (promo 2005) CR CNRS à Bordeaux
- Vincent Tassion (promo 3A 2010), PR Zürich

En algèbre, géométrie

- Elise Goujard (promo 2007), MC Univ. Bordeaux, médaille de bronze CNRS
- Mercedes Haiech, MC Limoges, Prix L'Oréal Unesco
- Matilde Herblot, MC Paris 7, Prix L'Oréal Unesco
- Adrien Leboudec (promo 2009) CR CNRS à l'ENS Lyon

En informatique

- Alain Couvreur (promo 2001) DR Inria
- Théo Pierron (promo 2012) MC Lyon

En économie

- Eric Gautier, PR Toulouse 1, ERC starting 2013

Parcours remarquables dans l'enseignement en CPGE

- Emmanuel Delsinne, Sainte Geneviève, Versailles
- François Giraud, Antonin Riffaut, Lycée du Parc, Lyon
- Manon Delville, Jonathan Harter, Montaigne Bordeaux
- Elisabeth Falq, Fermat, Toulouse
- Vassili Blandin, Clemenceau Nantes

Autres parcours

- Sarah Amri, corps de l'INSEE
- Fabien Conneau, actuaire
- Thomas Fabritius, trader, IMC trading
- Benjamin Favetto, ENSAE, Direction général du Trésor
- Benoit Patra, directeur technique, Ladvize
- Thomas Prest, cryptographie en entreprise, Pqshield

4.3.5. Projets emblématiques

Afin d'illustrer le positionnement scientifique du département, nous présentons brièvement 3 exemples de projet de recherche en cours puis, donnons une liste d'élèves dont le parcours en sortie d'école est remarquable. Cette liste non exhaustive permet de donner un aperçu de la variété des débouchés du département.

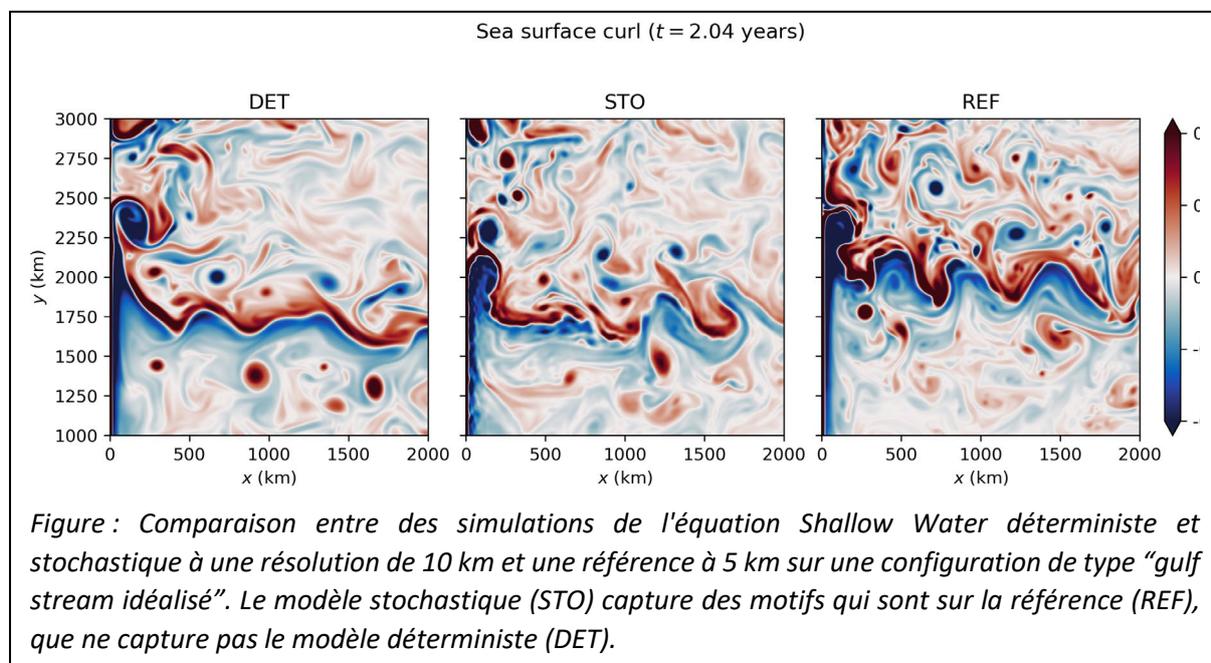
Modèles stochastiques de fluides

Résumé. Il s'agit de justifier rigoureusement et d'étudier mathématiquement des modèles stochastiques utilisés pour simuler des fluides turbulents. Le terme de bruit est présent pour représenter l'action des petites échelles sur les grandes échelles. Partant d'un système multi-échelles, on obtient à la limite une équation aux dérivées partielles stochastique pour les grandes échelles.

Nature : Projet de recherche en collaboration avec l'équipe de l'Inria Odyssey et le projet ERC synergy STUOD, en particulier avec Etienne Mémin et 2 élèves que nous co-dirigeons en thèse.

Implication de l'établissement : Arnaud Debussche, département de mathématiques. L'ENS Rennes accueille régulièrement Etienne Mémin et les 2 doctorants impliqués.

Description : Etienne Mémin a récemment développé une nouvelle catégorie de modèles à base d'équations aux dérivées partielles stochastiques pour décrire le comportement des grandes échelles d'écoulements turbulents ("models under location uncertainty"). L'idée de base est d'introduire des termes de bruit blanc dans la description lagrangienne du fluide. Ceux-ci sont très irréguliers et représentent les petites échelles non résolues. La dérivation classique des différents modèles (équations de Navier-Stokes, équation quasi-géostrophique, équations primitives...) utilisés pour le climat où les écoulements océaniques est modifiée et de nouveaux termes sont à prendre en compte dans les équations. Le but de ce projet est de rendre plus rigoureux cette dérivation. Par exemple, représenter les petites échelles par un bruit blanc suppose une séparation des échelles très forte. Ainsi, on a étudié une représentation des petites échelles par des processus dont la longueur de corrélation est petite mais pas nulle. On a pu montrer que lorsque cette longueur de corrélation tend vers zéro, les modèles convergent bien vers ceux dérivés initialement. Une autre direction est de partir d'un système décrivant les petites et les grandes échelles et de retrouver les modèles stochastiques dans une certaine limite. Un autre aspect de ce projet est l'étude rigoureuse de ces nouvelles équations (existence, unicité, comportement des solutions).



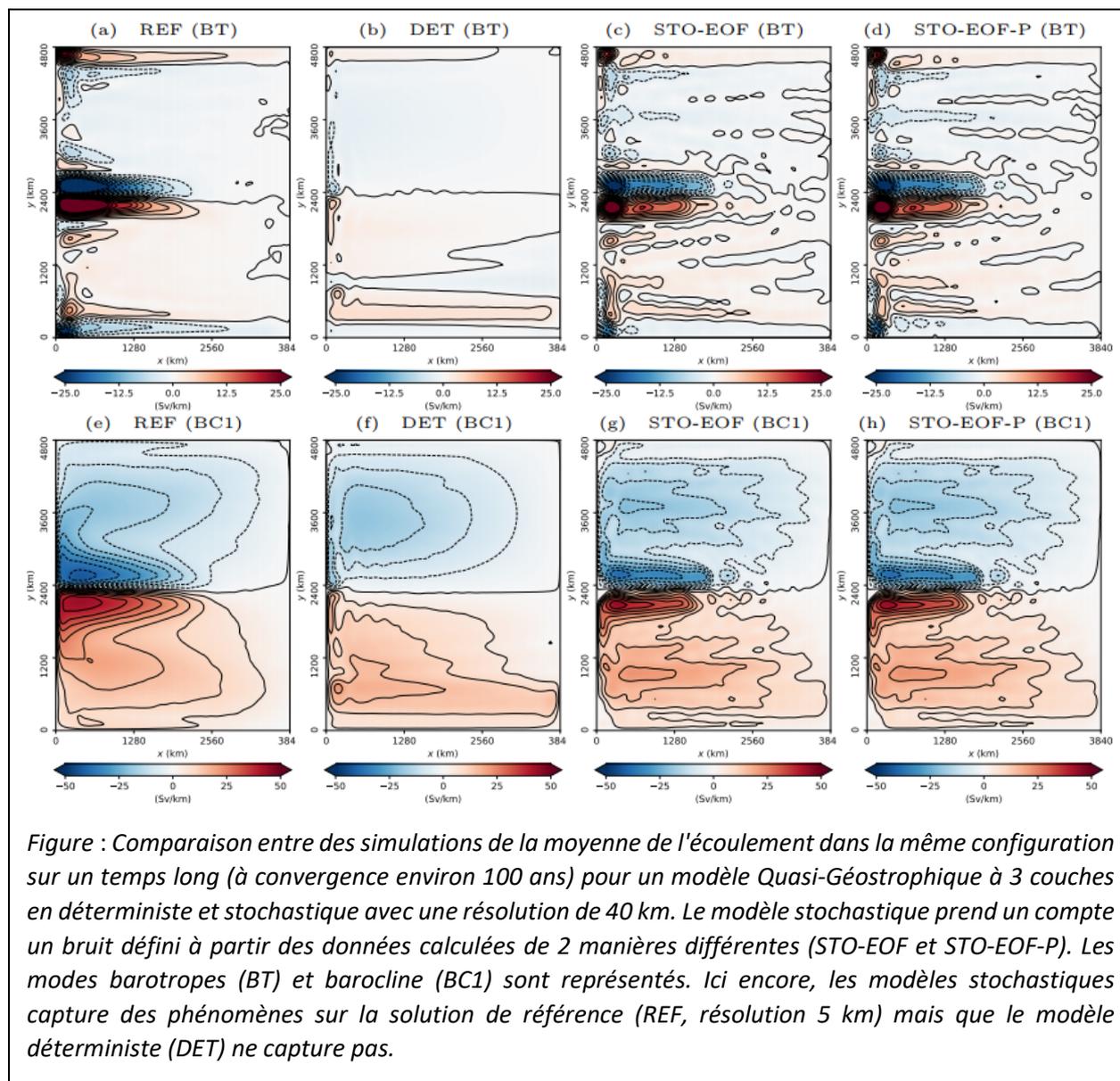


Figure : Comparaison entre des simulations de la moyenne de l'écoulement dans la même configuration sur un temps long (à convergence environ 100 ans) pour un modèle Quasi-Géostrophique à 3 couches en déterministe et stochastique avec une résolution de 40 km. Le modèle stochastique prend un compte un bruit défini à partir des données calculées de 2 manières différentes (STO-EOF et STO-EOF-P). Les modes barotropes (BT) et barocline (BC1) sont représentés. Ici encore, les modèles stochastiques capture des phénomènes sur la solution de référence (REF, résolution 5 km) mais que le modèle déterministe (DET) ne capture pas.

Références :

E. Mémin, Fluid flow dynamics under location uncertainty, Geophys. & Astro. Fluid Dyn., 108(2):119--146, 2014 ;
 A. Debussche, U. Pappalettera, Perturbation theory two-scale systems in fluid dynamics, second order perturbation theory of two-scale systems in fluid dynamics, arXiv:2206.07775, 2022.

Contrôlabilité, crochets de Lie et interpolation

Résumé : L'objectif est de caractériser la contrôlabilité locale d'équations différentielles, en termes de crochets de Lie des champs de vecteurs impliqués.

Nature : Projet de recherche de long terme en mathématiques sur plusieurs thématiques : analyse et algèbre.

Implication de l'établissement : L'ENS Rennes a permis l'émergence de ce projet de recherche en finançant le post-doc de Frédéric Marbach (2017-2018), sous la direction de Karine Beauchard, à l'issue duquel il a été recruté CR CNRS et affecté à Rennes (2018-2023). Au fil du temps, ce projet a

également impliqué Jérémy Leborgne (AGPR) et 2 doctorants (Mégane Bournissou ARED-ENS 2019-2022, Théo Gherdaoui CDSN 2022-), financés par l'école.

Description : Considérons un système physique sur lequel on peut agir à l'aide d'une commande dépendant du temps (par exemple une force ou une source de chaleur). Il est contrôlable si on peut l'amener de tout état initial à tout état cible en choisissant convenablement la commande. Cette propriété théorique est un prérequis pour des notions plus orientées vers les applications, telles que la stabilisation ou le contrôle optimal. Beaucoup d'aspects de la contrôlabilité des systèmes non-linéaires restent à comprendre, pour les équations différentielles comme pour les équations aux dérivées partielles.

Pour un système affine $y'(t)=f_0(x)+u(t)f_1(x)$ — où f_0, f_1 sont des champs de vecteurs sur \mathbb{R}^d , et $u(t)$ est une commande à valeurs réelles — un résultat fondamental implique que la contrôlabilité locale autour d'un équilibre y_{eq} (i.e. $f_0(y_{eq})=0$) est encodée dans les relations linéaires entre les crochets de Lie itérés de f_0 et f_1 évalués en y_{eq} . Mais une telle caractérisation reste un problème ouvert profond et fascinant. Des outils puissants ont été développés à la fin du XX^{ème} siècle pour obtenir des conditions suffisantes de contrôlabilité de plus en plus sophistiquées. Mais la recherche est restée entravée par l'absence de conditions nécessaires fortes. Quelques conditions nécessaires sont connues, mais elles sont "très loin" des conditions suffisantes connues, à cause d'un manque d'outils, pour distinguer, parmi les crochets, lesquels sont "bons" (c'est-à-dire le long desquels le système peut se déplacer dans les 2 sens) et lesquels sont "mauvais" (c'est-à-dire le long desquels le système ne peut se déplacer que dans un sens : on parle alors de dérive).

Notre équipe a obtenu de nouvelles conditions nécessaires, grâce à une interprétation des dérives comme conséquences d'inégalités d'interpolation fonctionnelle. Nous avons proposé une approche unifiée qui permet de redémontrer plus efficacement toutes les obstructions connues, et d'en démontrer beaucoup d'autres. Elle repose sur (1) une nouvelle formule de représentation de la solution $y(t)$, inspirée de la formule de Magnus et (2) une nouvelle base de l'algèbre de Lie libre, qui ouvrent de nouvelles perspectives pour la classification des crochets de Lie, entre "bons" et "mauvais".

K. Beauchard, F. Marbach, J. Leborgne. On expansions for nonlinear systems, error estimates and convergence issues. *Comptes Rendus Mathématique*, 361:97-189, 2023

K. Beauchard, F. Marbach. A unified approach of obstructions to small-time local controllability for scalar-input systems. *Arxiv:2205.14114*

Systèmes de particules en interaction

Résumé : Il s'agit d'étudier de grands systèmes de particules ou agents en interaction évoluant suivant des équations d'évolution stochastiques couplées, le couplage entre les équations modélisant les interactions entre les particules ou agents. Ces systèmes apparaissent naturellement dans des modèles de physique, de biologie mathématique et de grandes matrices aléatoires.

Nature : projet de recherche en réseau avec J. A. Cañizo (U. Granada, Espagne), D. Chafaï (ENS Paris), J. Fontbona (U. Chile, Santiago, Chili), A. Guillin (U. Clermont-Auvergne)

Implication de l'établissement : François Bolley, département de mathématiques

Description : Nous nous intéressons au comportement de grands systèmes de particules identiques, évoluant en temps suivant des équations différentielles stochastiques couplées. De tels systèmes modélisent des phénomènes de comportement collectifs. Ils sont classiques en physique puisqu'ils décrivent l'évolution d'astres de même masse, d'électrons, etc. Leur étude a récemment connu une grande activité en biologie mathématique dans la modélisation de mouvements collectifs de



Figure : nuée d'oiseaux.

Source : <https://www.leprogres.fr/science-et-technologie/2021/08/12/des-objets-mouvants-comme-des-nuees-d-oiseaux>

bactéries, de cellules et de petits animaux, en particulier la formation de structures cohérentes et synchronisées dans de grands groupes d'animaux sans leader.

Dans la plupart des exemples le nombre N de particules ou d'agents est très élevé : on peut ainsi dénombrer jusqu'à 10^9 criquets dans un nuage et jusqu'à 10^{12} étoiles dans une galaxie. L'étude numérique et théorique de tels systèmes d'équations nombreuses et couplées est alors difficile. C'est pourquoi l'on peut préférer remplacer cette description microscopique de chaque particule dans un espace des phases très

grand, de taille croissante très fortement avec N , par une description mésoscopique d'une particule moyenne, dite typique, dans un espace des phases réduit, constant en N . Cette procédure est appelée limite de champ moyen.

Les premiers résultats rigoureux sur cette limite datent des années 1960, dans des cadres peu quantitatifs et sous des hypothèses extrêmement fortes sur les modèles. L'enjeu actuel consiste à développer des techniques robustes, mêlant probabilités et analyse des équations aux dérivées partielles, permettant d'une part d'obtenir des résultats quantitatifs exploitables dans un cadre numérique, d'autre part de couvrir les modèles pertinents donnés par la physique et la biologie, enfin de pouvoir mettre en évidence des phénomènes fins d'auto-organisation dans ces groupes d'animaux ou de particules ou de transitions de phase.

Référence : F. Bolley, D. Chafaï, J. Fontbona. *Dynamics of a planar Coulomb gas*. *Annals of applied probability* 28, 5, 3152-3183 (2018)

4.4 Mécatronique

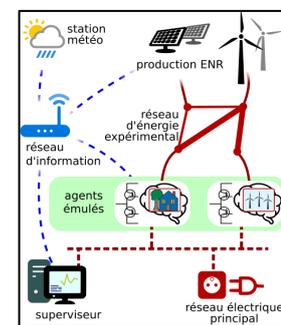
La mécatronique est la physique appliquée à l'ingénierie. Elle consiste en l'utilisation simultanée et en étroite symbiose des sciences et technologies de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique au sens large. La robotique fut certainement le domaine pionnier de la mécatronique, mais aujourd'hui, elle dépasse largement ce cadre.

La mécatronique conduit à de nouvelles approches et méthodologies de concevoir et de produire qui s'appuient sur une démarche système, à savoir la prise en compte initiale des interactions entre sous-systèmes. Faisant appel à un large spectre scientifique et technologique, elle ouvre, ainsi, de nouvelles opportunités à la créativité humaine pour répondre aux nouvelles exigences et défis notamment du développement durable.

4.4.1 Plateformes expérimentales

4.4.1.1 Plateforme "Smart Energy"

Sur le site de l'ENS Rennes, l'équipe dispose d'un plateau de 160 m² constitué de moyens expérimentaux et instrumentaux, en particulier d'une installation énergies renouvelables avec stockage (20 m² de PV, éoliennes, batteries Li-Ions, station météo, réseau secouru), d'un "smart grid" émulé via des nœuds de puissance pilotables et communicants originaux (nœuds développés en interne et proposé en open source, figure ci-contre), d'équipement de tests de chaînes complète de conversion électromécanique (traction électrique, production éolienne, stockage cinétique) et enfin d'un bassin pour des essais hydrodynamiques d'objets immergés.



4.4.1.2 Plateforme micro-technologie

L'ENS Rennes dispose d'une plateforme de micro-technologies qui permet le développement (design, fabrication, caractérisation) de micro capteurs et microsystèmes. La PFM-ENSC est composée d'une salle de caractérisation et d'une salle blanche classe 10000 de 80 m². Elle offre une concentration particulière maîtrisée, une régulation de la température, de l'humidité, et de la lumière pour certaines opérations sensibles aux rayonnements ultraviolets. La plateforme joue un rôle dans les recherches des équipes du département. Elle contribue également à la réalisation de projet de structuration régionaux, nationaux et internationaux. Elle remplit enfin une mission de formation dans le cadre d'enseignements dans le cursus des élèves de l'ENS Rennes et plus largement de l'Université de Rennes.



Plateforme de micro-technologie : Surface : 80 m², Classe 10000, Concentration particulière maîtrisée, Régulation de température et d'humidité, Lumière inactinique.

4.4.1.3 Plateforme "Immerstar" de capture du mouvement et de réalité virtuelle

Les deux plateformes rennaises Immersia et Immermove sont regroupées au sein du projet Immerstar dont nous assurons le pilotage scientifique pour l'ensemble des tutelles impliquées, ENS Rennes, Université de Rennes, Université Rennes 2, INSA Rennes, CNRS et Inria. Au sein des laboratoires IRISA

et M2S, la plateforme Immerstar, conçue dans un contexte pluridisciplinaire, et qui regroupe des équipements expérimentaux d'envergure mondiale répartis sur deux sites rennais, Immersia sur le campus de Beaulieu (Université de Rennes) et ImmerMove sur le campus de Ker Lann (ENS Rennes, Université Rennes 2). Ces deux plateformes physiques proposent des fonctionnalités et des objectifs complémentaires. Immersia a été conçue et développée pour héberger de nouveaux dispositifs d'immersion et d'interaction. ImmerMove a été conçue et développée pour étudier l'usage de ce type de technologie dans des domaines nécessitant de grands espaces, donnant une grande liberté de mouvements aux utilisateurs.

[Immersia](#) propose un environnement de travail unique en son genre par sa taille, 9.60 m x 3 m x 3 m, et sa technologie, 14 vidéoprojecteurs HD/3D, 4 écrans, système de capture de mouvement à base de caméras infra-rouge, son spatialisé 10.2.



[ImmerMove](#) propose un cadre unique en Europe permettant d'étudier des usages originaux nécessitant une grande liberté de mouvements pour l'utilisateur. Cette infrastructure installée dans un bâtiment de l'ENS Rennes, se compose d'un gymnase de 30 x 20 m permettant une analyse précise de l'activité physique humaine dans des conditions écologiques, et d'une structure immersive à 2 écrans, de 12 m x 4 m x 4 m. Elle dispose d'un système de capture de mouvements composé de 23 caméras infrarouges, de plateformes de force dans le sol et de mesures sans fil des activités électromyographiques (activité musculaire).

Les deux sites sont interconnectés pour permettre l'expérimentation de problématiques de collaboration locale ou distante sur un même environnement virtuel partagé de manière précise. Immerstar est un des nœuds du projet ESR/Equipex+ Continuum et est inscrite dans ce cadre à la feuille de route nationale des infrastructures de recherche.

4.4.1.4 Plateforme de fabrication mécanique

Les machines de production du laboratoire de fabrication de l'ENS Rennes sont des moyens expérimentaux performants. Il s'agit de machines industrielles, utilisées dans un cadre laboratoire représentatif du monde industriel. L'atelier est composé de classiques tours et fraiseuses à commande numérique, mais également de 3 machines d'usinage grande vitesse (dont 2 machines 5 axes). En outre, 2 machines appartiennent aux entreprises partenaires à l'école et sont utilisées pour des activités de recherche, en lien avec la plateforme SUNI. L'atelier comprend également un parc d'imprimantes 3D basées sur la technologie fil fondu, permettant de mettre en forme des polymères, métaux, composites et céramiques. En complément, des moyens d'enquête et de caractérisation des pièces, matériaux et surfaces sont disponibles. Récemment, des outils de réalités et augmentées, ainsi qu'un cube immersif CAVE sont venus compléter le parc de moyens disponibles afin de faciliter les approches de conception innovantes. En ce qui concerne les logiciels, l'école est dotée d'une dizaine de logiciels métiers parmi les plus industriellement utilisés pour ce qui est des activités de conception, de simulation, d'écoconception et d'analyse environnementale. Les équipements et personnels de la

plateforme SUNI s'inscrivent naturellement dans l'axe de recherche 4 Conception et fabrication durables.



4.4.2 Thématiques de recherche

Les thématiques de recherche du département mécatronique sont organisées selon **cinq axes** scientifiques et adressent un objectif central : **les nouvelles technologies au service de l'humain et de l'environnement**.

4.4.2.1 Axe 1 : Microsystèmes & micro capteurs

Sara Bretin, Florence Razan, Martinus Werts, Gurvan Jodin, IETR, SATIE

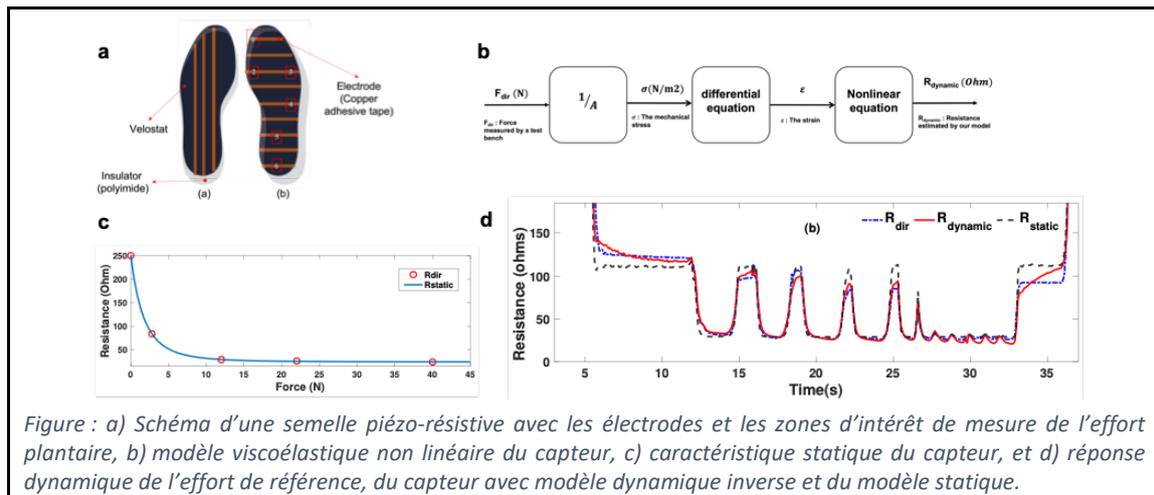
L'évolution des technologies numériques a, depuis peu, permis d'envisager un approfondissement de l'analyse du mouvement humain et de son environnement. Les objectifs sont donc de concevoir des systèmes avec de nouvelles fonctionnalités pour convertir un signal mécanique, physique, chimique ou biologique en signal électrique pour la mesure, l'enregistrement, le suivi et la transmission de paramètres issus d'un mouvement et/ou de son environnement. Les enjeux scientifiques se situent sur la chaîne complète du domaine des matériaux jusqu'au système. Les défis sociétaux et marchés applicatifs sont la santé, l'activité physique et l'environnement.

Objectif 1 : Mise en œuvre d'une méthodologie de développement de nouveaux transducteurs, matériaux, microtechnologies et électronique associée. Les verrous sont :

- Microtechnologies sur substrats divers (rigides, flexibles, organiques, inorganiques, biosourcés),
- Microcapteurs pour applications mécaniques, électrochimiques, chimiques, biologiques,
- Systèmes embarqués ou portés communicants.

Pour répondre à ces verrous, 3 thèmes types de transducteurs sont développés :

- transducteurs bio-sourcés et biodégradables dans le cadre du suivi de polymérisation d'un polymère biocompatible (PDMS),
- transducteurs électrochimiques, notamment dans le cadre du développement d'un outil dédié à la détection du plomb et du cadmium dans l'eau, qui a permis de multiplier par 300 l'intensité du courant détecté par des méthodes classiques,
- transducteurs électromécaniques. Des systèmes piézoélectriques et piézo-résistifs multi-électrodes sont mis au point pour permettre de suivre les paramètres mécaniques. Deux types d'application sont concernées : (1) le suivi de biomatériaux comme la polymérisation des protéines impliquées dans les maladies du type Alzheimer pour la compréhension des mécanismes de la maladie et une détection précoce, (2) la pression plantaire en fonction du mouvement grâce à la mise au point de transducteurs piézo-résistifs sur substrat souple et de leur modélisation (cf. figure ci-après).



Objectif 2 : Mise en œuvre d'une méthodologie de développement de nouveaux systèmes d'analyse du mouvement. L'enjeu repose ici sur le nombre de fonctions à intégrer tant au niveau des propriétés mécaniques, que chimiques et électriques. Les verrous sont :

- la constitution de bases de données et apprentissage,
- le placement et la configuration des capteurs,
- le traitement du signal,
- le développement de systèmes portés communicants et énergétiquement autonomes.

Pour répondre à ces verrous, 2 systèmes sont développés :

- système de reconnaissance du mouvement humain, notamment pour la modélisation de capteurs électromécaniques (IMU), associé à des outils de synthèse des données de capteurs et de reconnaissance du mouvement par apprentissage automatique,
- système de suivi du mouvement d'un corps immergé réalisé en commun avec l'axe 2.

4.4.2.2 Axe 2 : Transducteurs & Systèmes d'énergie soutenables complexes

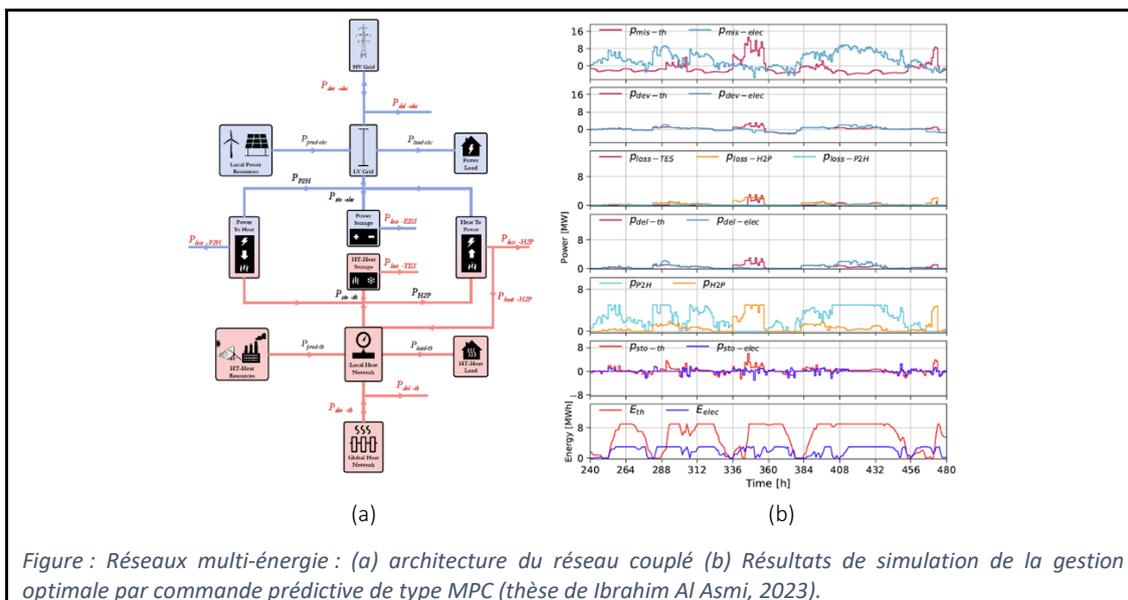
Hamid Ben Ahmed, Gurvan Jodin, Roman Le Goff Latimier, Anne Blavette, SATIE

Les activités de l'équipe liée à cet axe sont centrées sur l'optimisation des composants et des systèmes complexes. Le volet "composants" inclue la conception optimale de transducteurs (ex : capteurs, actionneurs électriques). De manière générale, les travaux de l'équipe sont menés dans une perspective de développement durable, et mettent l'accent sur l'analyse du cycle de vie et la prise en compte de critères environnementaux dans le développement de méthodologies de conception. C'est donc tout naturellement que notre équipe a lancé récemment des travaux sur l'éco-conception de convertisseurs statiques. Dans un contexte de consommation toujours plus importante de composants électroniques notamment dans le cadre de la transition énergétique (ex. véhicules électriques), et afin d'éviter un effet rebond, nos travaux se veulent contribuer à réduire l'impact environnemental de ces systèmes par une meilleure conception, un usage/contrôle plus efficace du cycle de vie et enfin une plus grande circularité (réparabilité, modularité, diagnosticabilité, valorisation).

Un autre volet des activités de l'équipe concerne les "systèmes complexes". Ces systèmes se définissent comme des ensembles d'entités individuelles présentant des interactions plus ou moins fortes entre elles, et dont le comportement global ne peut être prédit par l'analyse du comportement individuel de ses entités. Parmi les nombreux systèmes complexes naturels ou conçus par l'être humain, les travaux de l'équipe portent sur des systèmes pluridisciplinaires de transducteurs et les réseaux d'énergie intelligents multi-acteurs distribués (smart grids).

Pour le premier sous-thème (**systèmes de transducteurs**), thématique commune avec l’axe 1, on trouve les vêtements instrumentés et autoalimentés pour l’analyse du mouvement ainsi que l’instrumentation de corps immergés. Cette dernière problématique est menée en collaboration avec l’Université de Cambridge (Grande Bretagne) et WestLake University (Chine) pour découvrir comment les poissons utilisent les traces hydrodynamiques laissées dans le sillage d’autres poissons pour guider leurs décisions de mouvement dans les tâches de recherche et de navigation. Il s’agit (1) de mesurer les indices hydrodynamiques produits dans le sillage des poissons nageurs, (2) de déterminer comment les poissons répondent à ces traces et (3) de comprendre comment la perturbation ou l’imitation de ces signaux affecte les réponses des poissons. Un dispositif scientifique est conçu et réalisé pour mesurer les pressions dynamiques, analyser les vidéos des animaux, embarquer des algorithmes de fusion de données par l’intelligence artificielle. Il permettra de “se mettre à la place des poissons” et d’aider les zoologues dans leurs analyses.

Concernant le second sous-thème (**les réseaux d’énergie intelligents**), notre équipe s’intéresse à l’optimisation du dimensionnement des capacités et des lois de gestion de réseaux d’énergie intelligents, un pilier pour la transition énergétique. Ces réseaux peuvent inclure une ou plusieurs sources d’énergie (réseaux multi-énergies couplés : électricité, chaleur, hydrogène, bio-gaz) et sont destinés à intégrer un grand nombre d’entités flexibles intelligentes (ex : la recharge des véhicules électriques, le stockage d’énergie distribué, la production ou encore les consommations modulables) qu’il sera nécessaire de piloter. Le pilotage d’un grand nombre d’entités doit répondre à des contraintes à des niveaux tant locaux que globaux, dans un contexte où les décisions sont couplées temporellement et spatialement, tout en respectant des contraintes de temps parfois très impactantes (ex : temps de calcul maximal autorisé, latence des systèmes d’information). L’ensemble de ces points représente un verrou scientifique fort sur lequel notre équipe développe et/ou adapte des méthodologies originales issues de diverses communautés (ex. mathématiques, intelligence artificielle). L’aspect stochastique engendré par les diverses erreurs dues à une prévision imparfaite rajoute une complexité supplémentaire autant dans les lois de contrôle prédictif nécessaires que dans la modélisation des erreurs elles-mêmes.



4.4.2.3 Axe 3 : Biomécanique de l’interaction humain-systèmes

Georges Dumont, Charles Pontonnier, Équipe projet commune IRISA/Inria/M2S MimeTIC.

Les êtres humains interagissent de plus en plus avec des systèmes mécatroniques complexes, connectés et réactifs. Par exemple, dans le domaine du sport, les athlètes utilisent de plus en plus des systèmes de réalité virtuelle pour optimiser leur entraînement. Dans le domaine du handicap, les exosquelettes accompagnent progressivement la rééducation ou assistent les personnes à mobilité réduite, tandis qu'en ergonomie, ces systèmes doivent réduire la pénibilité des tâches au travail. La compréhension et l'analyse de l'interaction entre l'homme et les systèmes nécessitent une modélisation fine du comportement humain d'un point de vue biomécanique. De plus, cette compréhension ne peut se faire qu'à travers des expériences de terrain assurant une validité écologique à cette analyse.

Ces réflexions militent pour une systématisation du développement d'outils d'analyse de l'interaction. Par exemple, comprendre l'interaction d'un opérateur avec son exosquelette dans un objectif de minimisation des contraintes subies est nécessaire pour la dissémination et la systématisation de l'usage de tels systèmes dans un contexte de travail. De même, comprendre l'interaction d'un athlète avec son matériel sportif est un élément incontournable pour permettre une pleine exploitation de l'analyse biomécanique de sa performance.

Ainsi, notre thème de recherche concerne le **développement de modèles biomécaniques et de méthodes numériques pour l'analyse et la simulation de l'interaction humain-système**. Nous nous définissons ainsi en tant que biomécaniciens numériques, tout en ayant des connexions fortes avec les domaines de la robotique et de la réalité virtuelle.

Méthodologiquement, les questions scientifiques sont traitées suivant trois niveaux d'analyse de l'interaction (cf. figure ci-après) :

- **Le laboratoire** : c'est l'endroit naturel pour le prototypage des méthodes, dans lequel on retrouve les technologies les plus performantes de captation des efforts, du mouvement, de l'activité musculaire, etc... C'est aussi l'endroit privilégié pour réaliser une analyse du geste en conditions contrôlées.
- **La XR** : la réalité étendue (RV et RA) est un outil privilégié d'analyse du mouvement, dans lequel le contrôle peut être élevé tout en proposant des stratégies d'altération sensori-motrices possiblement utiles à l'entraînement et à la prévention. C'est aussi un lieu "sûr" permettant d'évaluer certaines pratiques dans des conditions sécurisées.
- **Le monde réel** : c'est ici que l'on cherche à appliquer les méthodes précédemment développées et à réaliser le travail d'analyse dans l'objectif applicatif visé. C'est aussi généralement ici que se trouve la motivation du travail scientifique qui a amené au développement des méthodes originales que l'équipe met au point.

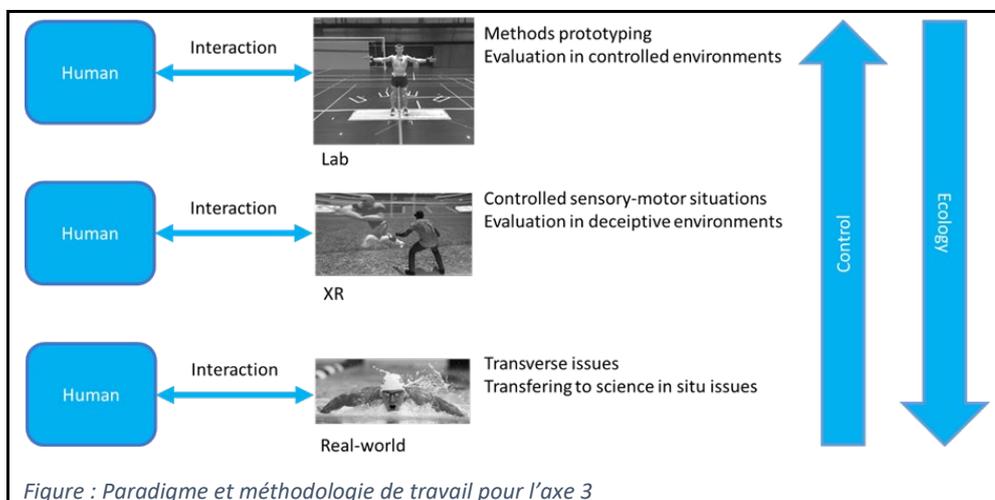


Figure : Paradigme et méthodologie de travail pour l'axe 3

4.4.2.4 Axe 4 : Conception et fabrication durables

Olivier Kerbrat, IPR

Il s'agit d'imaginer les méthodes, outils et techniques de production pour permettre la transition environnementale de l'industrie, vers une industrie innovante et soutenable. Si la prise de conscience des enjeux environnementaux est aujourd'hui bien établie chez les individus, dans les collectivités locales et dans certains secteurs économiques (agriculture, bâtiment, énergie), il n'en est pas de même dans le secteur de la production industrielle. En effet, les contraintes de compétitivité internationale et de marché évolutif imposent des objectifs en matière de qualité, coût, délai, flexibilité qui vont contraindre les industries dans leurs choix en laissant peu la place à d'autres objectifs tels que les performances environnementales ou sociales. Cependant, l'avenir de l'industrie de production passe par une meilleure prise en compte des aspects environnementaux et sociétaux, ce qui lance un défi aux décideurs de la prochaine génération qui sont les élèves de l'ENS Rennes et de l'Université de Rennes d'aujourd'hui et de demain. Les crises actuelles énergétiques et environnementales montrent bien l'importance d'une utilisation rationnelle des ressources et d'une maîtrise des rejets induits par la production.

Le défi sociétal de cet axe de recherche est donc d'être en mesure d'inclure dans les objectifs de performance des industries la dimension environnementale afin que les systèmes de production innovants soient raisonnés grâce à la combinaison d'approches technico-économiques traditionnelles avec des approches "durables". Ceci sera tout particulièrement appliqué au secteur de la mise en forme de matériaux amorphes et verres.



La figure ci-dessus présente les briques technologiques développées au sein de l'axe 4, basées sur la physique de la mise en forme appuyée par l'écoconception et l'éco-performance des procédés pour aboutir au concept d'industrie durable tel que définie par les Nations unies (objectif de développement durable n°9). Le travail se décline en deux approches couplées, locale (maîtrise et optimisation de la mise en forme) et globale (prise de décision pluri-performance).

4.4.2.5 Axe 5 : Didactique des sciences et technologies

Damien Grenier, CREAD

L'objectif de cet axe de recherche sur la didactique des sciences et technologies et l'éducation au développement durable est d'analyser des dispositifs pédagogiques traitant des questions relatives aux transitions environnementales (dont notamment les questions liées à la transition énergétique et aux énergies renouvelables) pour voir de quelle manière ils permettent de modifier les représentations qu'ont les élèves de ces sujets.

4.4.3 Projets emblématiques

How fishes use historical hydrodynamic motion cues in search and navigation tasks, projet de recherche emblématique de l'axe 1 (en interaction avec l'axe 2).

Résumé : Les écologues sont aujourd'hui incapables de comprendre comment les poissons utilisent les traces hydrodynamiques laissées dans le sillage d'autres poissons pour guider leurs décisions de mouvement dans les tâches de recherche et de navigation. Ce projet vise à comprendre finement l'hydrodynamique de ces traces, et nécessite le développement d'un instrument de mesure et d'estimation utilisant des algorithmes de fusion de données issus de capteurs de pressions, de caméras et de simulations numériques.

Nature : Ce projet est financé par le International Human Frontier Science Program Organization (HFSP) et s'étend de décembre 2022 à décembre 2025. Cette fondation promeut la recherche pluridisciplinaire pour la biologie sans frontière. Elle finance des projets internationaux ambitieux sous le thème général "Mécanismes complexes des organismes vivants".

Ce projet est constitué du trio Université de Cambridge (Royaume Uni), Université de West Lake (Chine) et département mécatronique de l'ENS Rennes. Ils forment une équipe aux compétences transdisciplinaires composée d'un zoologiste, d'un hydrodynamicien et d'un mécatronicien.

Description : Les écologues qui étudient les comportements sociaux des poissons ont des données d'entrées limitées aux mouvements relatifs des individus et une estimation de leur champ de vision. Or, une grande partie des poissons ont un organe proprioceptif sensible à la pression dynamique et aux traces hydrodynamiques laissées dans le sillage des autres individus.

Le consortium pluridisciplinaire est composé : d'un écologue spécialisé dans le comportement social de groupes d'animaux marins ; d'un hydrodynamicien spécialisé dans la modélisation et l'analyse de la turbulence issue de l'interaction fluide-structure par des méthodes d'intelligence artificielle ; et d'un mécatronicien spécialisé dans la conception de systèmes complexes multiphysiques.

Les points clés des problématiques du projet sont :

- Mesure de la signature, de l'échelle et de la stabilité des traces hydrodynamiques laissés dans le sillage des proies et des poissons prédateurs nageant librement : instrument de mesure avec algorithmes de fusion de données multi-fidélité ;
- Quantifier la façon dont les proies ou les prédateurs réagissent aux traces hydrodynamiques générés par les poissons pendant les tâches de recherche et d'évitement de la navigation : modélisation basée sur les données par méthodes d'IA (auto-encodeurs, réseaux de neurones...);
- Perturber ou imiter les signaux hydrodynamiques des poissons, tester leur rôle en tant que source d'information dans les tâches de recherche et d'évitement : transducteur hydrodynamique perturbant ou reproduisant les traces hydrodynamiques.

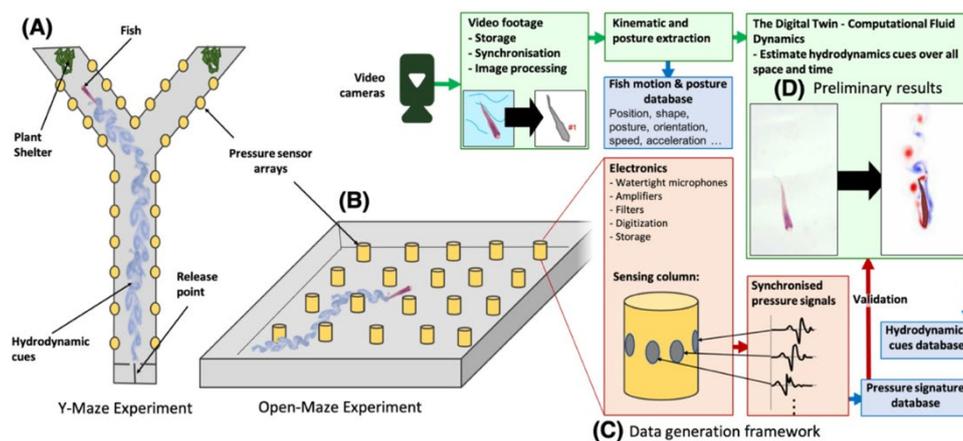


Illustration de l'instrument scientifique répondant au premier objectif quant à la mesure des traces hydrodynamiques. A et B) Schéma des 2 arènes expérimentales où évoluent les poissons parmi les capteurs. C) Concept du récif capteur de pression et du système de capture d'images.

Optimisation de la gestion de l'énergie dans les réseaux d'énergie intelligents, projet de recherche emblématique de l'axe 2.

Résumé : Les travaux de recherche dans l'axe 2 sur l'optimisation de la gestion de l'énergie dans les réseaux intelligents, ou *smart grids*, visent à développer de nouvelles méthodologies et modélisations pour la gestion d'un nombre toujours croissant d'entités flexibles (véhicules électriques, etc.) connectées à des réseaux de plus en plus complexes (grand nombre d'acteurs, multi-énergies, etc.). Les difficultés de ce problème sont multiples. Il nécessite une anticipation des événements futurs comme la production renouvelable ou la consommation, qui ne peuvent être parfaitement prévus. Ceci implique un contexte d'optimisation stochastique en grande dimension du fait de la multiplication des productions décentralisées et des agents flexibles. Ces agents sont couplés entre eux spatialement et temporellement, mais présentent des objectifs individuels qui sont potentiellement contradictoires. L'enjeu est donc non seulement de proposer des méthodes de résolution de ce problème d'optimisation stochastique de grande dimension, mais également de les rendre compatibles avec une implémentation réelle, comme par exemple, via un marché pair à pair.

Nature : Les travaux de recherche sont menés par le biais de simulations numériques ainsi que via des expérimentations sur une plateforme en laboratoire (plateforme OpENS), et sur le terrain (ex : projet ELFE). Plusieurs projets sont menés sur cette thématique dans le laboratoire et se poursuivent via notamment les projets suivants (non-exhaustif) décrits ci-dessous.

Description : Trois projets emblématiques actuellement en cours sur cette thématique sont les suivants :

- Projet ANR " EDEN4SG " Gestion dynamique et efficace de l'énergie pour les smart grids de grande taille (2023-2027, 583 k€). Ce projet se destine au développement de méthodes décentralisées permettant la gestion en temps-réel d'une flotte de véhicules de grande taille, en respectant des contraintes de temps-réel, de réseau, etc. et basées sur le concept des systèmes multi-agents adaptatifs combiné à des méthodes issues de l'apprentissage automatique. Ce projet se penchera également sur le "coût économique et environnemental de l'information" lié à l'infrastructure de télécommunications nécessaire au pilotage du réseau intelligent. Partenaires : Orange Labs, IRIT, IRISA, SRD, EDF R&D.
- Projet "ELFE" : Ce projet est une expérimentation à l'échelle d'un territoire de la flexibilité énergétique sur le volet de l'électricité. Le territoire de l'expérimentation possède des moyens de production d'électricité renouvelable (principalement éolien, photovoltaïque et biomasse).

L'idée que les habitants du territoire puissent devenir consommateurs de cette électricité implique un changement de comportement des consommateurs.

Ainsi le projet ELFE implique les habitants, les collectivités et les entreprises en les incitant à consommer l'énergie électrique lorsqu'elle est produite localement. Ceci avec pour objectif de favoriser l'autonomie énergétique d'un territoire en optimisant l'utilisation des productions renouvelables locales (solaire et éolien). L'expérimentation permet de tester de manière concrète (pendant 2 ans) les impacts techniques, économiques et sociaux de la flexibilité énergétique à l'échelle d'un territoire (Redon Agglomération, Communauté de communes de Pontchâteau Saint-Gildas). Elle s'inscrit dans une démarche plus globale qui inclue sobriété, efficacité énergétique et énergies renouvelables.



Cette expérimentation vise donc à rassembler un panel de 200 consommateurs répartis entre les secteurs résidentiel, économique/industriel et tertiaire/collectivités. Une attention particulière est portée à la participation et aux facteurs de changement des comportements des consommateurs dans le projet.

Un outil de gestion des flux énergétiques sera développé et déployé sur le panel. Les appareils électriques des consommateurs seront connectés au système via des outils numériques afin de suivre en temps réel la consommation et piloter en temps réel ceux qui peuvent l'être en fonction du bilan énergétique du territoire.

- **Projet PEPR TASE "DC Architect"**. La généralisation de l'électronique de puissance et des composants utilisant du courant continu DC (ex. batteries, photovoltaïque) suscite un regain d'intérêt pour les réseaux DC. De plus le considérable besoin d'investissements dans les systèmes d'énergie du fait de la transition énergétique conduit à questionner l'architecture même des réseaux électriques. Pour répondre à ces enjeux, le projet PEPR DC-Architect rassemble 16 laboratoires français, dont le laboratoire SATIE (budget laboratoire 503k€, 2023-2028). Notre contribution dans ce projet d'envergure concerne tout d'abord l'étude des réseaux mixtes AC-DC exploitant les complémentarités entre courant continu et alternatif. En particulier, nous appliquons à cette question une démarche d'éco-co-optimisation. Il s'agit de considérer l'efficacité d'un système sur toute sa durée de vie, en prenant en compte son vieillissement, ses coûts environnementaux de construction et de démantèlement. De plus, le dimensionnement optimal d'un système dépend nécessairement de la manière dont il sera opéré au cours de sa vie : ce couplage entre dimensionnement et gestion -- démarche de co-optimisation -- nécessite donc de résoudre les deux problèmes de manière imbriquée l'un dans l'autre. Notre seconde contribution concerne la résilience des systèmes électriques, lorsqu'ils sont confrontés à des événements rares mais perturbant fortement leur fonctionnement. Partenaires : G2ELab, AMPERE, CEA, IREENA, L2EP, GEEPS.

Références :

1. S. Zafar, A. Blavette, G. Camilleri, H. Ben Ahmed, and J.-J. P. Agbodjan, "Decentralized optimal management of a large-scale EV fleet: optimality and computational complexity comparison between an Adaptive MAS and MILP," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 147, p. 108861, 2023.
2. Le Goff Latimier, R. & Ben Ahmed, H. (2023). Peer to peer electricity markets. In *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, vol 2. Elsevier, 99 384-401. 2023

Cosimulation humain-exosquelette pour le prototypage virtuel, projet de recherche emblématique de l'axe 3 (biomécanique de l'interaction humain-systèmes).

Résumé : Développement de méthodes numériques de prototypage pour les systèmes d'assistance à contention (exosquelette) incluant une représentation biomécanique fine de l'utilisateur en interaction avec le système. Le projet propose des applications pour l'humain au travail et pour l'assistance au handicap. Ce projet naît du besoin d'outils de prototypage permettant de faciliter le développement de ces systèmes et leur dissémination vers le grand public.

Nature : Ce projet s'appuie sur différents projets structurants et collaborations en cours, dont voici une liste non exhaustive.

- **Projet Exoscarne** (Post doctorat d'Aurélié Tomezzoli, projet région bretagne entre Lab4i (porteur industriel), ENS Rennes (porteur universitaire) et Cooperl (end user)). Prototypage d'un exosquelette de poignet pour l'assistance à la découpe de viande, dans le secteur de la boucherie industrielle.
- **Projet PyToM** (Ingénieure de recherche Salomé Ribault, aide au transfert technologique de Inria). Développement d'une librairie d'analyse du mouvement en python, permettant d'évaluer les contraintes biomécaniques (mouvement, efforts) mis en jeu au cours de l'interaction d'un humain avec un système.
- **Cosimulation humain – exo pour les systèmes passifs** (thèse d'Etienne Ricard, financée par l'Institut National de Recherche en Sécurité). Développement d'un modèle de simulation humain-exosquelette pour l'analyse de l'assistance au niveau de l'épaule.



Figure : Un modèle musculosquelettique d'analyse de l'interaction humain – exosquelette (thèse d'Etienne Ricard) (axe 3)

Description : Les problématiques scientifiques associées à cette question sont de :

- développer des modèles biomécaniques performants, permettant une analyse fine de la charge articulaire et musculaire au cours du mouvement ;
- développer des modèles d'interface humain exosquelette performants, permettant une restitution fine des actions mises en jeu à ces interfaces et ne nécessitant pas des temps de calcul non compatible avec le prototypage industriel ;
- mettre en œuvre des méthodes d'évaluation de l'impact des exosquelettes permettant de valider leurs fonctions ;
- imaginer et appliquer des stratégies de suivi long terme permettant de mieux comprendre l'adaptation motrice au système et les ajustements de contrôle nécessaires à sa bonne appropriation.

La figure ci-dessus représente un modèle musculosquelettique d'un travailleur en interaction avec un exosquelette d'assistance de l'épaule. L'objectif est d'évaluer l'impact du système sur l'activité musculaire de l'épaule pour optimiser son réglage lors de tâches réalisées au-dessus de la tête.

Références :

1. Livet, C., Rouvier, T., Sauret, C., Pillet, H., Dumont, G., & Pontonnier, C. (2022). [A penalty method for constrained multibody kinematics optimisation using a Levenberg–Marquardt algorithm](#). *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 1-12
2. Pontonnier, C., Marie, S., Chander, D. S., Kirchofer, S., & Gréau, M. (2021). [Evaluating the action detection of an active exoskeleton: a muscle-control synchronicity approach for meat cutting assistance](#). *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 1-2.

- Muller, A., Pontonnier, C., Puchaud, P., & Dumont, G. (2019). [CusToM: a Matlab toolbox for musculoskeletal simulation](#). *Journal of Open Source Software*, 4(33), 1-3.

Indicateurs de performance de la fabricabilité innovante et durable, Projet de recherche emblématique de l'axe 4

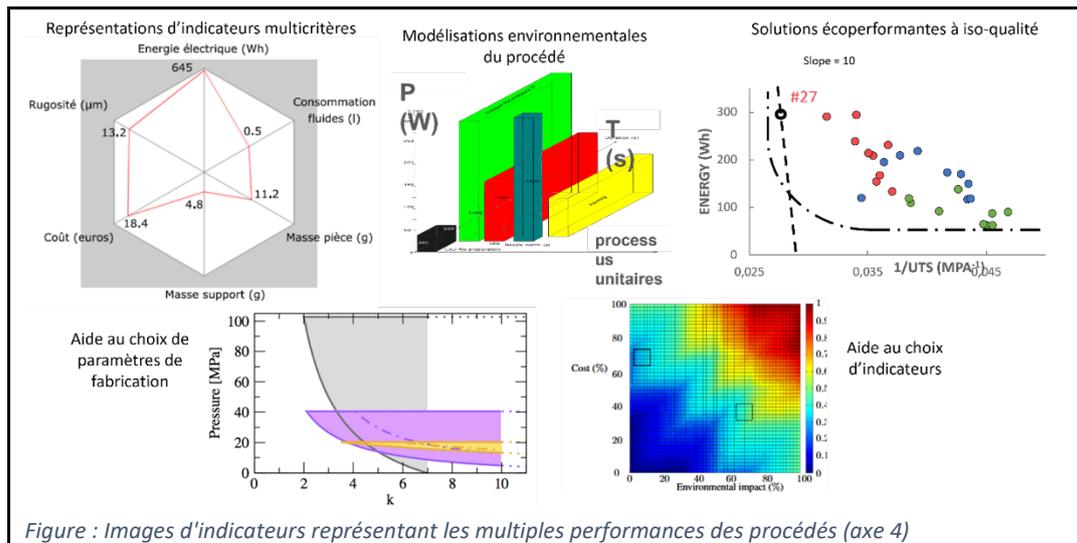
Résumé : L'objectif est de partir de connaissances fines des technologies de mise en forme afin, dans un premier temps, d'identifier et caractériser des indicateurs reflétant les performances des procédés, puis, dans un second temps, de modéliser ces indicateurs afin de pouvoir prédire les performances.

Nature : Ce projet se développe depuis une dizaine d'année au travers de travaux d'étudiants de mécatronique (en L3 et en M1), de stage de M2 et de thèses de doctorat (3 soutenues, 3 en cours). Il contribue à la normalisation internationale ISO 14955 sur l'évaluation environnementale des machines-outils (implication dans le groupe de travail ISO et dans la commission de normalisation française UNM). Le projet est porté par Olivier Kerbrat, avec l'appui d'élèves du département, de la plateforme SUNI et des moyens de fabrication présents dans les laboratoires de l'ENS Rennes, de Centrale Nantes et de l'Université de Rennes. Il se déroule à l'Institut de recherche en génie civil (UMR CNRS 6183) et bénéficie de collaborations industrielles pour un montant financé de 1,7 million d'euros depuis 2013.

Description : Les deux problématiques scientifiques majeures à traiter sur ce projet sont :

- Les multiples dimensions de la performance : bien sûr il y a les performances de fabricabilité (coût-qualité-délai) traditionnelles, mais l'évolution de l'industrie impose de regarder de près d'autres performances (flexibilité, impacts environnementaux notamment). Notre équipe a donc développé des indicateurs dans les différentes dimensions de la performance : indicateurs de fabricabilité, de performance environnementale, de performance technique et économique. Ils sont basés sur une maîtrise technique des technologies de fabrication additive (métallique, polymères, composites), d'usinage par enlèvement de matière, de formage incrémental par jet d'eau, de découpe (jet d'eau et laser), de mise en forme des composites, de soudage par friction malaxage.
- L'exploitation de ces indicateurs pour prendre des décisions sur le process : l'idée n'est pas uniquement de "compter" la performance une fois que le produit a terminé son cycle de fabrication, il est également très pertinent de modéliser ces indicateurs pour prédire les performances. Il faut alors créer des méthodes qui permettent d'exploiter ces modèles au plus tôt de la chaîne de décision, c'est-à-dire lors des phases de conception. Notre équipe a ainsi développé plusieurs méthodes qui permettent d'exploiter l'expertise sur les technologies de fabrication, traduites en indicateurs, avant la phase de fabrication : méthode de conception pour les produits modulaires hybrides, méthode de "design for additive manufacturing", méthode d'évaluation environnementale et méthode d'évaluation multicritères. Toutes ont été assorties de démonstrateurs informatiques puis appliquées à des cas industriels grâce à des partenariats forts avec des entreprises.

La figure ci-dessous présente quelques images illustrant les représentations d'indicateurs de performance pour les procédés de fabrication et leurs exploitations.



Références:

1. Le Gentil, T., Therriault, D., Kerbrat, O. [A comprehensive methodology to support decision-making for additive manufacturing of short carbon-fiber reinforced polyamide 12 from energy, cost and mechanical perspectives](#), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, publié le 11/03/2023.
2. Lacoma, V., Bailleul, J.-L., Moisan, S., Vincent, G., Biniétruy, C., Kerbrat, O. [Inventory analysis of the carbon fibres reinforced polyphenylene sulfide thermos-stamping manufacturing process](#), *Journal of Cleaner Production* 393, 2023, 136337.

Éducation au développement durable, Projet de recherche emblématique de l'axe 5

Résumé : L'objectif est d'analyser des dispositifs pédagogiques mis en œuvre pour traiter de questions environnementales (changement climatique, transition énergétique, impacts environnementaux sur la biodiversité) pour voir de quelle manière ces dispositifs modifient les représentations qu'ont les étudiants de ces sujets.

Nature : Cette thématique de recherche a été développée en s'appuyant sur différents projets financés :

- Projet Labex Cominlabs "3DMOOC" (2013-2016) : réalisation et évaluation de "grains" vidéos (vidéos de quelques minutes), dont certains en 3D pour l'enseignement de la problématique de l'insertion des énergies renouvelables dans les réseaux électriques à différents niveaux d'enseignement (école primaire, collège, école d'ingénieur). Utilisation de l'exemple d'une île (l'île de Sein).
- Projet DUNE-DESIR Energ'île (2018-2020) : Développement d'un "serious game" à destination des étudiants du supérieur pour un apprentissage actif sur la problématique de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. Adaptation d'un jeu développé par C. Barrué pour les lycéens.
- Projet EDD-Sup (2021-2023, financement MESRI) : évaluation de dispositifs d'éducation aux transitions écologiques (Fresque du Climat, jeux de rôle sur l'énergie) au sein de trois établissements d'enseignement supérieur rennais (ENS Rennes, Centrale-Supélec Rennes, École des métiers de l'environnement, UniLasalle, Rennes)

Description : La méthodologie d'analyse utilise, comme données, des questionnaires soumis aux étudiants avant et après mise en œuvre du dispositif pédagogique, des enregistrements audio et vidéo

des séances encadrées et des entretiens semi-directifs, individuels ou par groupes, pour expliciter certains points.

Nous nous sommes, dans un premier temps, focalisés sur les connaissances acquises par les étudiants (montée en compétences). Nous nous sommes ensuite intéressés aux enjeux pris en compte par les étudiants dans le traitement des tâches proposées, pour vérifier qu'ils prenaient bien en compte l'ensemble des dimensions (techniques, économiques, sociales, environnementales) du problème. Nous nous attelons à présent à tenter de cerner les transformations de leur représentation des problématiques traitées, en prenant en compte les objets de savoirs qu'ils considèrent, la forme de ces objets (connaissances, principes, valeurs, modèles...), la manière dont ils gèrent les éléments de controverse propres à ces questions socioscientifiques (QSS), la complexité (prise en compte des différentes échelles de temps, d'espace, des interactions linéaires, en réseau ou systémiques) et enfin les valeurs qu'ils convoquent.

Pour ce faire, nous faisons évoluer sans cesse les outils pédagogiques étudiés en fonction des résultats obtenus et des objectifs visés.



Figure : Jeu de rôle sur les énergies renouvelables (axe 5)

4.5 Sciences du Sport et Éducation Physique (2SEP)

4.5.1 Positionnement

Le département 2SEP se donne comme ambition de créer les conditions de productions de connaissances scientifiques et professionnelles permettant d'accompagner, par l'activité physique tout au long de la vie, les trois transitions à l'œuvre : numérique, sociétale et environnementale.

Pour atteindre cet objectif, la formation articule de façon complémentaire les compétences nécessaires pour développer une démarche scientifique préalable à un doctorat avec celles nécessaires à l'agrégation et, plus généralement, à l'enseignement. L'objectif de 60% de poursuite en thèse (contre 40% actuellement) pour l'ensemble de la promotion (sans distinction de statut) apparaît raisonnable à horizon 2027 ; l'objectif de 90% à 100% de réussite à l'agrégation externe d'EPS demeure en parallèle.

Les élèves développent un **savoir-être** basé sur les valeurs de curiosité, d'engagement et d'esprit éthique et critique bienveillant, un **savoir-faire** considérant la capacité à travailler de manière collaborative et avec des outils adaptés et des **savoirs** appartenant à des champs différents, mais capables d'être reliés entre eux. Pour cela, le département est constitué d'une équipe d'enseignants-chercheurs capables, par des études menées en commun, de croiser les champs disciplinaires autant que d'appréhender la double logique de formation : enseignement/recherche. Cette complémentarité scientifique doit permettre aux élèves comme à l'équipe d'enseignants, de générer des projets de recherche en adéquation avec les mutations considérées comme positives à la société. Accompagner la société dans ses défis, c'est aussi induire le sens des défis à affronter.

Le département 2SEP se perçoit donc comme un acteur de la transformation à venir de la société **dans le rapport à sa pratique physique**. Plus précisément, dans une société de l'individu, le projet vise à construire les modalités permettant à chacun d'avoir un mode de vie actif et solidaire, critique et connecté à son environnement. La démarche vise à répondre à un double objectif, celui de favoriser l'activité physique et celui de répondre aux enjeux environnementaux. La question du rapport au corps, aux autres, et à l'environnement sont au cœur de ce double objectif dans une reconnexion à ces différentes composantes.

Le développement du numérique a inscrit les personnes dans une situation de distraction (au sens de constante double attraction de l'attention). Pour mieux envisager les relations de l'individu au sein de son environnement, le projet de département consiste à générer les outils intellectuels et scientifiques qui permettront l'apprentissage d'un rapport au monde et au corps, au prisme de la pratique physique. L'envergure sociétale du projet n'est pas seulement à considérer dans les effets d'un enseignement en éducation physique (dont la portée demeure incommensurable) mais aussi à saisir les populations les plus diverses, en âge comme en capacité motrice, de l'enfant au senior et de l'activité physique adaptée à la quête du record sportif. La diversité des orientations possibles se retrouve dans le double appui des laboratoires Mouvement, Sport, Santé (M2S) et Valeurs, Innovations, Politiques, Socialisations et Sports (VIPS²).

Les mutations du rapport de l'individu à son environnement se font au prisme de trois transitions, à l'aune des activités physiques, sportives et artistiques. Ce sont trois enjeux qui ont intégré notre plan de formation de Master (60h), participent du diplôme d'ENS et impulsent des projets de recherche au sein du département. Voici la définition que nous arrêtons pour chacune d'entre elles.

TRANSITION NUMERIQUE : saisir la mutation à l'œuvre dans le domaine numérique consiste à conduire – de manière lucide et critique – un changement de rapport aux outils numériques. Pour l'appréhender, le département permet aux élèves de se saisir du développement technologique dans le monde des

pratiques et de l'Activité Physique (AP), à l'instar des capteurs ou des caméras immersives. Ces outils permettent de mieux analyser l'activité du pratiquant, mais créent aussi une distance entre le pratiquant et son environnement direct. A un second niveau, appréhender le développement technologique pour améliorer les pratiques interroge sur son impact sociétal et environnemental et sur la réalité même de la question du "progrès". *In fine*, le département vise à développer un regard critique, une capacité à maîtriser les outils numériques et ses implications, de façon à les rendre compatibles avec les deux autres transitions.

Ce versant appelle à la considération technique et analytique de l'activité physique telle que développée en cohérence avec le laboratoire M2S et l'investissement des enseignements sur les capteurs, tout autant que ceux qui investissent la quantification de la charge d'entraînement, mais aussi dans la conception de l'acceptabilité sociale des outils numériques ou de l'engagement dans la pratique en cohérence avec les orientations du laboratoire VIPS2. Les projets menés sur la validité de capteurs pour évaluer le pattern de marche ou encore évaluer la dépense énergétique lors de l'activité physique témoigne de cette dynamique (deux CDSN, un post-doc SAD, entre autres). Les relations avec le département mécatronique, directement ou par l'intermédiaire de projets inter-départements, permettent d'allier les ressources de l'établissement avec les logiques de formation des départements autour des transitions.

La qualification et la quantification des données sur le corps en mouvement peuvent alors être heureusement sujet à des réflexions sur la dissonance potentielle entre le corps perçu, le corps conçu et le corps vécu.

TRANSITION ENVIRONNEMENTALE. La transition environnementale vise à permettre le passage d'un état de consommation des ressources de l'environnement (au sens large, y compris le groupe social) au profit d'une relation plus symbiotique de l'individu avec son environnement. Ce nouvel état d'équilibre apparaît comme le seul garant – à l'échelle planétaire – de la viabilité de l'humanité. Elle présuppose une reconsidération de la place de la nature par rapport au versant anthropocentré et interroge les pratiques physiques dans leur transition pour faire face à cet enjeu.

De la même manière que l'on croyait abusivement à la moralité éducative magique du sport, il existe un postulat selon lequel il suffirait de mettre l'enfant, l'élève, l'adulte dans la nature pour qu'il soit saisi de son évidente puissance d'adhésion ; il y a un enjeu qui est exploré actuellement à travers une éducation à l'environnement, par des pratiques physiques choisies, qui permet de repositionner les modes de fonctionnement de chacun avec ses loisirs. Les mémoires portés par les élèves en recherche sur les conflits d'usage (de la montagne ou de la mer) s'appuient sur les travaux présents au VIPS² et ont été poursuivis, dans une logique en sciences de l'intervention avec l'assise de la discipline scolaire de l'EPS autour de l'éducation à l'environnement, marchepied des transformations fulgurantes de la société que les rapports du GIEC invitent à conduire. Des mémoires de L3, un mémoire de Master 2 et un financement de thèse (RAME) démontrent le déploiement en cours.

TRANSITION SOCIETALE. La transition sociétale participe du nécessaire enjeu de favoriser l'activité physique et de lutter contre les discriminations. La mutation visée cherche à repenser une socialisation qui trouvera dans les pratiques physiques des moyens de transformation de relations sociales dans le sens du bien commun. De manière plus philosophique, les pratiques physiques et corporelles deviennent un vecteur de reconstruction d'un facteur social structurant dénommé l'intérêt général. Cependant, il ne peut s'exprimer qu'à la condition de reconfigurer l'individualisme égocentré actuel – un individualisme négatif – pour redonner à autrui sa fonction positive. Plus aisément, remplacer la mise en concurrence par la solidarité.

La pratique sportive puise ses origines dans le fait que les populations cherchaient à avoir une activité de loisirs ensemble, un plaisir de sociabilité autour d'une pratique ludique à voir ou à faire. L'ensemble des dynamiques pour concevoir la manière dont les individus en groupe, ou par l'intermédiaire des politiques éducatives scolaires, permettent de voir les fondements historiques et sociologiques qui participent, de manière profonde, aux mutations de société dans le rapport au sport et/ou au corps. La façon dont le corps s'approprié le sport renseigne d'une configuration sociale et exprime le rapport des individus à leur chair comme à leur sphère.

La notion de mode qui s'empare des pratiques physiques a été analysée historiquement, étude portée par un CDSN. La notion d'inclusion des populations migrantes est appréhendée sociologiquement. Les processus complexes de socialisation par le sport et autres activités physiques sont mobilisés et investigués pour donner à voir comment les interactions entre pratiques conduisent à des changements sociaux, préalables à des mutations de société.

La transition numérique est là. Pour ne pas aller à contre-courant d'une politique responsable, elle doit être mise au service des deux autres transitions et participer à la construction d'un double habitus, sanitaire et solidaire, qui s'inscrit à l'intérieur de l'activité physique quotidienne.

Il y a un double mouvement à considérer par l'ensemble des champs disciplinaires investis. Le premier se fonde sur le mode de fonctionnement de l'individu dans son rapport à une pratique physique en tant qu'activité sociale. Le second, qui croise le premier, se fonde sur la façon dont les pratiques physiques, en tant qu'expression de l'environnement (dans son acception très large) de l'individu, affecte les comportements individuels. Le département se propose de placer les trois transitions au sein de cette double dynamique. **A l'échelle de l'individu**, l'objectif recherché consiste à permettre à chaque individu d'être en paix avec son corps dans son environnement et, concomitamment, de mettre son corps en action et de le gérer. **A l'échelle sociale**, l'objectif recherché consiste à permettre de voir les facteurs de socialisation sous-jacents aux modalités d'éducation à chacune des transitions au prisme des pratiques physiques.

Aussi, en partant depuis l'individu, nous pouvons établir des espaces d'études pluridisciplinaires, où chaque discipline est capable de se déployer seule, mais également de venir composer un système scientifique pluri- voire interdisciplinaire, pour résoudre des problématiques aux interfaces. Nous mobilisons ainsi les Sciences de la vie et de la Santé (physiologie, biomécanique), les Sciences humaines (psychologie sociale et sciences de l'intervention) et les Sciences sociales (histoire, sociologie).

4.5.2 Projets Emblématiques

Illustration 1 : Couplage du Géo-Positionnement Satellitaire et de l'accélérométrie dans l'étude de la locomotion humaine avec quantification de la dépense énergétique associée (Projet ACTI-GPS)

Résumé : L'objectif principal du projet ACTI-GPS (2012-2016) était de déterminer la validité de la mesure par Géo-Positionnement Satellitaire (GPS) pour étudier la marche d'un point de vue de la détection des périodes de marche et de l'estimation de la dépense énergétique associée. Un objectif secondaire était de comparer la validité du GPS à celles d'autres mesures par moniteurs d'activité, à savoir l'accélérométrie et la cardiofréquencemétrie.

Nature : ACTI-GPS s'inscrivait dans le champ des Sciences du sport et plus précisément dans la thématique de la mesure du comportement physique humain. Ce type de projet doit permettre d'améliorer la mesure et la quantification de l'activité physique des personnes, ce qui est crucial pour une analyse ultérieure des relations entre activité physique et santé. Il doit aussi permettre de mieux

quantifier l'activité de marche lors de sessions de marche spécifiques mise en œuvre dans le cadre de réadaptation ambulatoire connectée chez des personnes atteintes de maladies chroniques. ACTI-GPS a impliqué un doctorant financé par un CDSN (Pierre-Yves de Müllenheim) et une post-doctorante financée par l'ENS et la région Bretagne à travers un dispositif SAD (Aline Taoum). Le projet a été principalement financé par la fondation GENESIA et par l'ENS Rennes à travers la mise à disposition de matériels appartenant au département. Il a abouti à la publication de quatre articles dans des revues internationales à comité de lecture et huit communications en congrès (dont sept congrès internationaux). En lien avec les collègues et élèves de mécatronique, une plateforme Web de traitement de données de moniteurs d'activité pour l'évaluation du pattern de marche a également été développée (<https://mapam.ens-rennes.fr>).

Implication de l'établissement et des partenaires. ACTI-GPS a été porté par Alexis Le Faucheur et a impliqué le Pr. Jacques Prioux (département 2SEP). Il a aussi été le support au développement de stages inter-département avec des collègues et des élèves du département de Mécatronique. Il a été réalisé en collaboration avec l'Institut de formation en éducation physique et sportive d'Angers (Pr B. Noury-Desvaux), ainsi qu'avec le CHU d'Angers (Dr S. Bickert, Pr Abraham) et le CHU de Rennes (Pr Mahé) compte tenu du fait qu'un des contextes d'application concernait l'utilisation des moniteurs d'activité pour étudier les limitations à la marche de patients présentant des limitations fonctionnelles. ACTI-GPS a aussi permis de développer des collaborations avec l'IRMAR, l'Institut Agro Rennes-Angers, l'ENSAI, le département Mathématiques et Informatique Appliquées aux Sciences Humaines et Sociales pour tout ce qui concernait les analyses statistiques (Mathieu Emily : IRMAR, L'Institut Agro Rennes-Angers. Laurent Rouvière : IRMAR, ENSAI, Université Rennes 2).

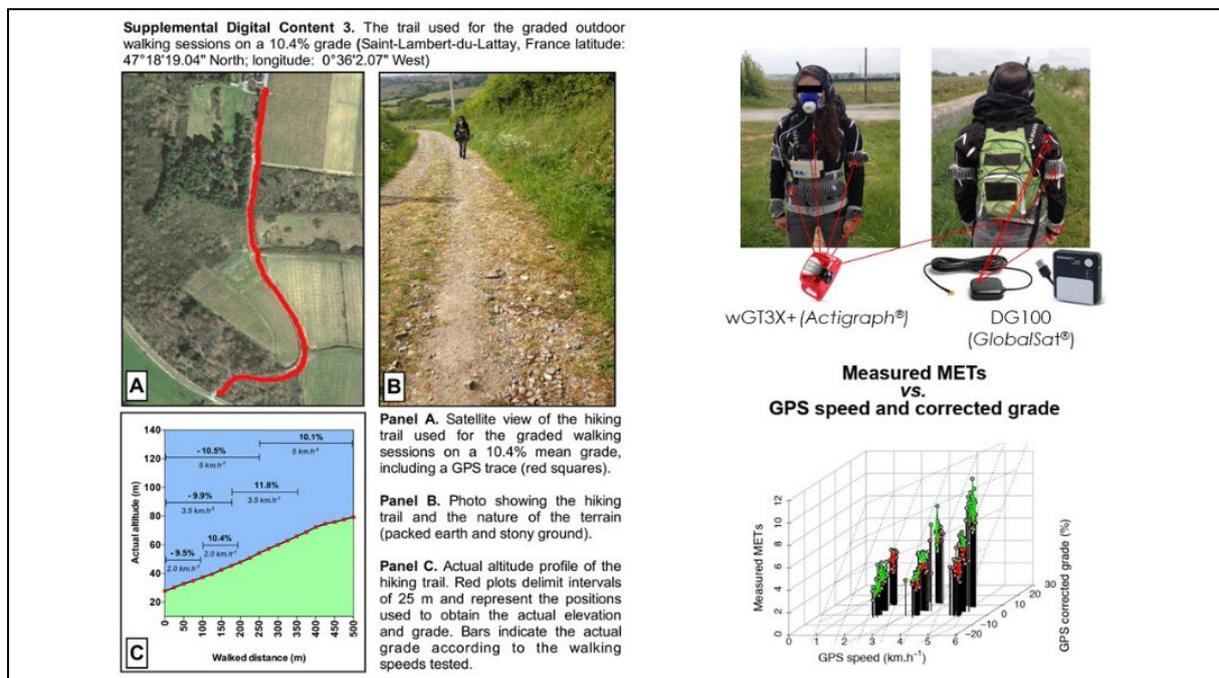


Illustration montrant une partie de la mise en place expérimentale de l'étude (à gauche), les dispositifs utilisés (en haut à droite) : accéléromètre wGT3X+ et GPS DG100) et la variation du taux de dépense énergétique (METs) en fonction de la vitesse et de la pente (corrigée) obtenues par mesure GPS (adapté de : de Müllenheim et al., jsams, 2017).

Illustration 2 : RAME : "Recherches sur les Aires Marines Educatives"

Résumé : L'éducation à l'environnement fait partie des pistes majeures pour appréhender la transition environnementale. L'Education Physique et Sportive (EPS), en tant que discipline scolaire, est particulièrement interrogée sur sa contribution à cet enjeu : à travers les activités de pleine nature, la dimension collective de ses pratiques mais également le rapport au corps et des émotions qu'elle

suscite. Bon nombre de projets et de recherches se développent sur des projets “en dehors” de la classe, dans le cadre d’actions de sensibilisation ou de sorties pédagogiques. **L’objectif de ce projet de recherche-formation collaboratif est de conceptualiser des dispositifs pédagogiques favorables à une éducation environnementale en EPS, et de développer un ensemble d’outils de formation à l’échelle académique et nationale.**

Les enjeux climatiques sont au cœur des questions de formation et d’éducation, abordés à l’école par le biais de l’Education au Développement Durable (EDD). Malgré des tentatives pour développer ces approches dans les établissements scolaires, elles restent encore peu présentes dans les textes officiels, et sont souvent appréhendées par un apport limité aux connaissances sur l’environnement (UNESCO, 2021). Des projets se développent dans les établissements scolaires, mais restent souvent à la marge des disciplines, par le biais d’actions de sensibilisation ou de séjours pédagogiques. Les difficultés des enseignants à intégrer pleinement ces enjeux citoyens au cœur de leurs pratiques pédagogiques sont particulièrement liées à un manque de formation (Drewes, 2020), et à un positionnement éthique délicat face à des questions qui sont empreintes de valeurs et de questions socialement vives (Fabre, 2011). Face à un engouement fort pour les “classes dehors” à l’école primaire, les difficultés dans l’enseignement secondaire persistent aussi à cause notamment d’un cloisonnement disciplinaire et de contraintes institutionnelles. L’EDD est ainsi souvent abordée par le biais de la transmission de connaissances sur l’environnement, qui maintient une conception anthropocentrique de l’environnement, où chaque composante du système est jugée uniquement par rapport à son utilité pour l’Homme (Kopnina, 2015). Le potentiel éducatif de ces approches mérite d’être nuancé puisqu’elles ne permettent pas d’interroger la place de l’Homme au sein de son écosystème et des interactions avec l’ensemble de ses composantes. Ainsi, “nous ne devons pas seulement étudier ou protéger la nature, mais surtout repenser notre place dans un environnement auquel nous appartenons mais qui ne nous appartient pas” (Gottsmann & Terré, 2022). Les dimensions corporelle, émotionnelle et sensible semblent donc être des leviers pertinents pour repenser les relations entre les individus et leur environnement, en cherchant à développer un mode de relation en résonance et plus serein (Rosa, 2018).

Même si l’EPS est souvent associée à un ensemble de finalités citoyennes et d’enjeux éducatifs, la question environnementale reste encore peu présente dans les programmes de la discipline, ou bien abordées uniquement par le biais de connaissances liées à la sécurité et à la maîtrise de l’environnement naturel (Paintendre, Terré & Gottsmann, 2021). Dans les pratiques, beaucoup de dispositifs se développent en dehors de la classe, par exemple lors de séjours en pleine nature ou de sorties scolaires. Même si la littérature scientifique révèle l’importance de vivre des expériences en pleine nature pour avoir un impact sur des attitudes respectueuses de l’environnement (Mirrahimi et al, 2011), les Activités Physiques de Pleine Nature (APPN) doivent être interrogées au regard de leur rapport à l’environnement. D’abord, parce qu’elles ont un impact environnemental négatif sur les habitats naturels, terrestres et marins, contribuant ainsi à la réduction de la biodiversité (Lagabrielle et al, 2018), encore plus dans un contexte de massification de ces activités de loisirs pour le plus grand nombre. Plus encore, la conception “anthropocentrique” des pratiquants de ces activités mérite d’être discutée : l’espace naturel est vu comme un “terrain de jeu”, un espace à dominer et à contrôler (Schnitzler & St Martin, 2020), peu favorable à une vision écocentrique de l’environnement. Les APPN sont donc à la fois riches en expériences marquantes pour les élèves, par les émotions qu’elles procurent, tout comme elles peuvent aussi nuire à cette éducation environnementale, reflétant bien les controverses environnementales (Mounet & Boudin, 2021) auxquelles nous sommes confrontés.

Face à ces constats, l’EPS a donc pleinement son rôle à jouer dans l’éducation à l’environnement par les pratiques sur lesquelles elle s’appuie, mais également par les dimensions corporelles, sensorielles

et collectives qu'elle implique. Pour autant, de la même façon que les sports collectifs n'éduquent pas "naturellement" au vivre ensemble, les APPN n'éduquent pas "naturellement" à l'environnement.

Ce projet de recherche-formation collaboratif autour de l'éducation à l'environnement a donc pour ambition de développer des dispositifs pédagogiques susceptibles de contribuer à cet enjeu, et d'outiller les enseignants qui souhaitent s'engager auprès de leurs élèves sur ces questions au cœur des pratiques quotidiennes en EPS, et plus globalement au sein de leurs établissements scolaires.

L'ENS est porteur de ce projet depuis le départ avec le financement d'un post-doctorat (Anne Renoux, 2022-2023) et d'une thèse (Brewal Soyez-Lozach, 2022-2025) soutenant les activités de recherche de Léa Gottsmann, porteuse du projet. C'est également par le financement d'un stage de M2 (Kilian Mandrillon) via l'Allocation d'Installation Scientifique (Rennes Métropole) de Léa Gottsmann, que ce projet s'est développé. Plusieurs partenaires sont impliqués : le VIPS², la MSHB, l'UFR STAPS de l'Université de Bretagne Occidentale, le CREAD de l'Université Rennes 2, le Rectorat, l'Office Français de la Biodiversité et le Réseau d'Education à l'Environnement en Bretagne. Des demandes de financement complémentaires (Fondation de France et IFé à Lyon) vont permettre de développer le projet, à des échelles territoriales (ouverture des terrains d'études en métropole et outre-mer) et à des partenaires plus variés, notamment en termes de recherche-formation.

Illustration 3. FORMEEPS : histoire de la formation des enseignants d'EPS

Ce projet historique permet de saisir la diversité des formations des enseignants d'EPS et de voir, comment, derrière les dynamiques collectives d'une discipline scolaire, les effets locaux participent aussi à teinter les orientations. Il donne une épaisseur aux processus sociaux les plus profonds en permettant d'accéder aux effets sur le long terme des décisions prises au niveau des politiques éducatives.

Le projet a été co-porté par Jean-Nicolas Renaud, membre du département 2SEP et du laboratoire VIPS2. Il a été co-porté par Julien Fuchs, PU à l'UBO, membre du CRBC. Il a mobilisé dix laboratoires et inclus des collègues en histoire de l'éducation physique de Strasbourg, Reims, Besançon, Toulouse, Nancy, Angers, Grenoble, Lille, Brest et Rennes, dont un autre historien du VIPS2. Il en a résulté un ouvrage paru aux Presses Universitaires de Rennes en 2020. Le projet a été soutenu par la MSHB, mais également par l'ENS Rennes, par l'UFRSTAPS de Rennes, le VIPS2 et le CUIP⁵ pour la publication du travail final. Certains élèves de 2^e année ont été associés à l'étude par de la recherche d'archives ou par leur analyse.

Lancé par le projet HESRIB, porté par André Lespagnol, rend compte de la façon dont la coexistence des différentes structures de formation (CREPS ou IREPS) a influencé sur le type de formation des enseignants d'éducation physique et comment ces influences ont été également marquées par des individualités très fortes. Au final, le structurel et le fonctionnel construisent un environnement singulier où les orientations plus pratiques ou plus théoriques des savoirs mobilisés varient. Ainsi, la valence pédagogique était très forte sur l'espace rennais ; une valence très sanitaire s'est construite au niveau de Strasbourg avec une logique identitaire alsacienne qui s'est couplée à la démarche de la Fédération Française de Gymnastique Volontaire. Au niveau de Toulouse, siège de Camille Soula – éminence du CNRS, les logiques universitaires de la science ont prévalu sur les logiques plus pratiques et empiriques de l'enseignement. C'est une philosophie analogue qui s'est exprimé au niveau de Grenoble, etc. Nous avons perçu alors, au-delà des spécificités locales, la nécessité d'avoir toujours au moins une doublette d'influence, où les enjeux politiques croisent avec les enjeux identitaires et fonctionnels d'une discipline scolaire en cours de maturation sur le second vingtième siècle. Les

⁵ CUIP : Comité Universitaire d'Information Pédagogique

personnes au sein de la structure de formation doivent connaître des relais, à l'échelle rectorale, ministérielle ou plus prosaïquement politicienne, pour porter des transformations notables dans la façon de préparer les enseignants d'éducation physique à leur futur métier.

In fine, chercher à comprendre le fonctionnement de la formation des enseignants d'EPS permet de voir comment les politiques éducatives, à l'échelle nationale, trouvent une résonance mais parfois des inerties à l'échelle locale. Les transitions voulues par les gouvernements sont alors reconfigurées sous l'effet des actions de personnalités placées en des lieux stratégiques et influents.



4.6 Sciences pour l'Environnement

4.6.1 Positionnement

Approche systémique. En formation comme en recherche, nous abordons les défis environnementaux actuels dans une démarche fondée sur l'observation du milieu naturel en cohérence avec les unités de recherche de l'OSUR et en complémentarité avec les approches de Sciences Humaines et Sociales. Appréhender les défis environnementaux nécessite d'en avoir une vision systémique, c'est-à-dire une approche globale, prenant en compte à la fois les phénomènes individuels qui composent les systèmes environnementaux et leurs interactions. Etant donnée la complexité des systèmes environnementaux, leur caractérisation implique d'intégrer un approfondissement de chaque discipline dans des démarches interdisciplinaires.

A titre d'exemple, les élèves du PhD Track de la promotion 2022-2024 travaillent sur la résilience des systèmes naturels à la sécheresse. Leur analyse concerne l'impact de la sécheresse de l'été 2022 sur l'eau et la biodiversité dans la vallée du Couesnon. En s'intéressant aux relations entre eau et biodiversité, chacun est amené à faire preuve de pédagogie pour expliquer les méthodologies et les connaissances de son domaine aux autres élèves tout en approfondissant ses compétences dans sa propre discipline.

Approche quantitative. Étant fondamentalement un département de taille réduite au sein de nos unités, nous avons fait le choix concerté avec l'OSUR de nous focaliser sur les approches quantitatives bénéficiant de la proximité avec les autres départements de l'ENS Rennes et des opportunités pédagogiques et scientifiques aux interfaces. L'approche quantitative en sciences de l'environnement consiste à formaliser les observations provenant du terrain, d'expériences ou encore de sciences participatives. L'utilisation d'outils méthodologiques permet de faire le lien entre les données récoltées et des concepts plus larges qui visent à avoir une vision globale des problèmes. Notre objectif est de faire dialoguer ces approches, qui s'enrichissent mutuellement. En effet, les données nourrissent les modèles, et permettent de comprendre les processus à l'œuvre dans les milieux. Le département Sciences pour l'Environnement travaillera en partenariat avec les départements de mécatronique, d'informatique et de mathématiques. Nous travaillerons ensemble à la conception et à la calibration de capteurs et instruments innovants et à la modélisation des phénomènes, l'analyse des problèmes qui en découlent et la quantification des incertitudes.

Que les phénomènes soient modélisés via des lois physiques, biochimiques, ou par des processus empiriques, le caractère pluridisciplinaire du département permet de mobiliser des corpus de connaissances diversifiés pour les comprendre en profondeur. La compréhension fine des aspects théoriques des modèles permet ensuite de les questionner, et de revenir aux données afin d'enrichir la réflexion. Il peut s'agir de comprendre a posteriori les données, aussi bien que d'orienter les questions à poser pour de nouvelles expériences.

Recherche. Notre engagement dans la recherche aborde les défis environnementaux, ce qui nécessite fréquemment des approches interdisciplinaires. Le département fait le lien entre différentes disciplines et unités de recherche, par la diversité des membres qui le composent. En 2023, il est composé de :

- Françoise Amélineau (écologue, ENS Rennes, UMR Ecobio) travaille sur les effets des changements globaux sur les populations d'oiseaux marins et notamment sur leurs déplacements. Elle cherche à comprendre comment ils utilisent l'espace et optimisent leurs dépenses énergétiques lorsqu'ils recherchent de la nourriture et lorsqu'ils migrent, et quelle est la plasticité de leur comportement dans un environnement changeant.

- Jean-Raynald de Dreuzy (modélisation en environnement, CNRS, UMR Géosciences Rennes) analyse l'effet des structures hydrologiques et géologiques sur la distribution des ressources en eau et l'impact du changement climatique sur leur évolution. A l'interface entre les sciences naturelles, mathématiques et numériques, il contribue à la prédiction de l'évolution des systèmes environnementaux. Il intervient dans le département comme administrateur provisoire.
- Hélène Hivert (mathématicienne, Inria, UMR Géosciences Rennes). Spécialiste de l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles, et plus particulièrement des problèmes multi-échelles, elle est titulaire de la CPJ de l'Inria *Modéliterre*. Ce projet consiste à développer la recherche en mathématiques à l'interface avec les géosciences.
- Camille Vautier (hydrogéologue, ENS Rennes, UMR Géosciences Rennes) s'intéresse aux pollutions de l'eau d'origine agricole (en particulier nitrates et antibiotiques vétérinaires). Elle identifie les processus contrôlant le transport et la transformation des polluants dans les bassins versants, avec pour objectif le développement de méthodes de prédiction de la qualité de l'eau applicables à grande échelle.

Le département est encore en construction. Les futurs recrutements apporteront de nouvelles thématiques, qui renforceront les liens entre les unités, et enrichiront l'approche systémique du département en recherche et en formation.

Formation à la recherche dans la démarche pédagogique et les thématiques scientifiques. Le département développe plusieurs approches afin de promouvoir l'interdisciplinarité dans la démarche pédagogique.

En premier cycle, le CPES porté en commun avec le lycée Chateaubriand et l'Université de Rennes propose une formation de base généraliste sur les sciences et la société. Le premier semestre est commun aux deux parcours (sciences et société), puis une spécialisation progressive est mise en place, tout en conservant une mineure sciences ou société tout au long des 3 ans. Cette formation permet de donner aux élèves les bases nécessaires pour leurs futures collaborations pluridisciplinaires dans la poursuite de leurs études et dans leur vie professionnelle. Les sciences de l'environnement sont à l'interface entre différents domaines tels que la biologie, la géologie, la physique et la chimie. L'enseignement académique généraliste est complété par un enseignement d'initiation à la recherche mené en mode projet dans lequel le département est particulièrement investi.

Au niveau master, la formation PhD Track s'appuie sur la diversité des origines des élèves. Il est le fruit d'une collaboration fructueuse avec l'Université de Rennes, l'Université Rennes 2 et l'Institut Agro Rennes-Angers. La pédagogie est construite sur un projet de recherche au long cours sur lequel ils travaillent tous ensemble durant leurs deux années de formation. Chaque élève amène une expertise acquise dans sa formation d'origine pour nourrir les débats avec le groupe et permettre de croiser des données de nature différente. Le projet de chaque promotion est mené de bout en bout en autonomie sous la supervision de chercheurs issus de différentes disciplines. A l'issue de cette formation, les élèves poursuivent leurs études en thèse de doctorat dans le domaine des sciences de l'environnement.

Relations avec les unités et établissements partenaires. En créant un nouveau département de Sciences pour l'environnement, et en collaboration avec les unités de recherche du site rennais impliquées dans l'OSUR, l'ENS Rennes a pour mission de contribuer à la dynamique locale. Elle vise à former de nouvelles générations de chercheurs et de décideurs à la complexité des systèmes naturels et de leurs relations avec les humains.

4.6.2 Projets emblématiques

Illustration 1 : Etude de la désertion de nichée chez une sterne, la guifette moustac.

Françoise Amélineau (ECOBIO, ENS Rennes), Jean-Marc Pallisson, Alexandre Corbeau (ECOBIO, CNRS), Laura Beau (Réserve Naturelle Nationale de Chérine, Brenne)

Chez la majorité des espèces d'oiseaux, les soins parentaux sont partagés par les mâles et les femelles [1]. Chez certaines espèces cependant, il arrive que l'investissement diffère entre les partenaires, l'un des deux réduisant son investissement dans la reproduction en cours au profit de sa propre valeur sélective (survie, investissement dans des reproductions futures), l'autre parent étant souvent contraint de s'investir davantage [2,3]. On parle alors de conflits parentaux. Une forme que peut prendre ce conflit est la désertion de nichée, l'un des partenaires arrêtant le nourrissage des jeunes avant leur indépendance, confiant alors le soin à l'autre parent de poursuivre le nourrissage. La désertion de nichée peut permettre à l'individu déserteur de s'investir immédiatement dans une nouvelle nichée, ou d'améliorer sa propre survie et les opportunités de reproduction futures. Une hypothèse est que la désertion de nichée a lieu plus fréquemment lorsque les conditions environnementales sont bonnes, le partenaire déserté ayant alors la possibilité de compenser tout ou une partie de l'apport alimentaire du parent déserteur [4]. L'objectif de notre étude est de tester cette hypothèse chez la guifette moustac (*Chlidonias hybrida*).

La guifette moustac est une petite sterne qui se reproduit sur des nids flottants sur des étangs. Il a été montré que ce sont principalement les femelles qui désertent dans une population polonaise où les ressources sont abondantes [5]. Une étude similaire est en cours sur une population de Brenne (Région Centre-Val de Loire), où les conditions environnementales sont moins favorables [6]. Depuis 2020, un suivi de nids est effectué chaque année et le comportement de nourrissage des deux partenaires est quantifié par des focales régulières. Cela a permis de construire une base de données pour étudier l'investissement parental et la désertion.



Figure 1 : Guifette moustac (*Chlidonias hybrida*) et ses deux poussins, © Jean-Michel Pilorget

Afin d'élargir nos connaissances sur la guifette et de mieux comprendre les conflits parentaux, le suivi de la désertion de nichée va être complété par des équipements d'individus avec des balises GPS. Ces équipements effectués sur des mâles et des femelles nous permettront de mesurer l'utilisation de l'habitat à fine échelle et comparer les zones d'alimentation suivant le sexe. En raison du dimorphisme sexuel (les mâles étant plus gros que les femelles), on s'attend à des différences de proies capturées et de zones d'alimentation [7,8]. De plus, l'étude des mouvements de femelles déserteuses nous permettra de quantifier quelle proportion effectue une seconde reproduction la même année, et si elles partent plus tôt que leurs congénères en migration.

[1] Cockburn A. Prevalence of different modes of parental care in birds. *Proc R Soc B Biol Sci.* 2006;273: 1375–1383.

[2] Houston AI, Székely T, McNamara JM. Conflict between parents over care. *Trends Ecol Evol.* 2005;20: 33–38.

[3] Lessells CM. Sexual conflict. The evolution of parental care. Oxford: Oxford University Press; 2012. pp. 150–170.

[4] Wojczulanis-Jakubas K, Jiménez-Muñoz M, Jakubas D, Kidawa D, Karnovsky N, Cole D, et al. Duration of female parental care and their survival in the little auk *Alle alle*—are these two traits linked? *Behav Ecol Sociobiol.* 2020;74: 1–11.

[5] Ledwoń M, Neubauer G. Offspring desertion and parental care in the Whiskered Tern *Chlidonias hybrida*. *Ibis*. 2017;159: 860–872.

[6] Beau T, Debenest E, Bonenfant C, Paillisson J-M, Bretagnolle V. Demography of a French historical stronghold of breeding Whiskered Tern and its association to both local and wintering ground conditions to inform its conservation. In prep.

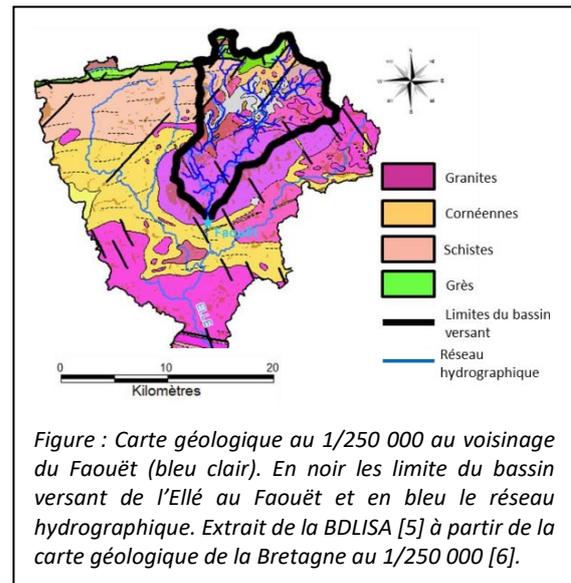
[7] Gwiazda R, Ledwoń M. Sex-specific foraging behaviour of the Whiskered Tern (*Chlidonias hybrida*) during the breeding season. *Ornis Fenn*. 2015;92.

[8] Gwiazda R, Ledwoń M. Sex-specific food choices in Whiskered Terns *Chlidonias hybrida* during chick rearing. *Ardea*. 2016;104: 95–98.

Illustration 2 : Identification régionale des propriétés hydrauliques des socles cristallins superficiels

Jean-Raynald de Dreuzy (Géosciences Rennes, CNRS), Hélène Hivert (Géosciences Rennes, Inria)

Les milieux souterrains contiennent la majeure partie des ressources en eau douce accessibles [4]. Les eaux y sont en général de bonne qualité et largement utilisées pour l'adduction en eau potable. En France, les deux tiers de l'eau distribuée proviennent des aquifères. Les quantités exploitables varient de presque rien à des capacités propres à alimenter des régions entières de façon pérenne [3]. Au-delà de cette vision globale, les ressources restent difficiles à identifier dans des milieux géologiques complexes et impossibles à cartographier à l'échelle qu'il faudrait pour comprendre la distribution des stocks et des flux d'eau. Les régions de socle cristallin, comme les massifs Armoricaïn et Central en France ou la majeure partie de l'Afrique et l'Inde à l'échelle mondiale, sont particulièrement touchées par ce déficit de connaissance et, en conséquence, par un manque chronique de capacités de gestion et une vulnérabilité accrue au changement climatique [2].



L'objectif de ce projet, à l'interface entre les mathématiques appliquées et l'hydrologie, est d'identifier les conductivités hydrauliques des milieux cristallins, via une approche globale. En effet, les méthodes classiques d'évaluation sont locales, ce qui mène à des biais d'échantillonnage et rend difficile l'évaluation des ressources en eau dans les milieux géologiques complexes. L'utilisation de données globales, comme les chroniques de débit en rivière, permet d'éviter ces difficultés. En revanche, elles sont plus difficiles à interpréter. En effet, les données globales mélangent l'effet de plusieurs entités géologiques. L'enjeu est de séparer les effets de chaque entité géologique des débits de rivière mesurés à l'aval. On utilise les chroniques de débit d'un nombre suffisant de stations de jaugeages pour identifier les valeurs de conductivité hydraulique de chacune des entités géologiques. Cela suppose également qu'une entité géologique localisée à plusieurs endroits ait des propriétés proches. Les travaux de Nicolas Cornette [1] permettent de poser cette hypothèse dans la partie bretonne du massif armoricaïn.

D'un point de vue mathématique, le problème se présente comme la détermination des distributions de probabilités des conductivités hydrauliques de chaque entité géologique. Les données globales utilisées sont les conductivités hydrauliques équivalentes de chaque bassin versant déterminées dans la thèse de Nicolas Cornette [1]. Ainsi, chacune de ces conductivités hydrauliques équivalente est une combinaison linéaire des conductivités hydrauliques élémentaires, les coefficients de la combinaison linéaire étant donnés par la composition géologique du bassin versant considéré. Comme le nombre de stations de jaugeage est nettement supérieur au nombre d'entités géologiques considéré, il s'agit d'un problème largement surdéterminé, qui peut être résolu à l'aide de méthodes d'optimisation adaptées.

La détermination des conductivités hydrauliques de chaque entité géologique permettra également de revenir sur les hypothèses faites dans la modélisation du problème. En effet, pour que la classification des lithologies faite a priori soit pertinente, il faut que les variances de leurs conductivités soient faibles. Dans le cas contraire, il faudrait revoir la classification en prenant en compte d'autres paramètres. Le cas échéant, des outils mathématiques d'optimisation sous contrainte permettront de déterminer les proportions dans lesquelles une lithologie devrait être subdivisée en deux (ou plus) classes distinctes. Pour ce problème, il s'agira donc de ne pas seulement considérer un problème de minimisation sous contrainte, mais de faire le lien entre la caractérisation des solutions possibles, l'interprétation des paramètres admissibles et les données des bassins versants considérés.

Ce projet a fait l'objet d'une réponse à l'AAP 2023 de l'Institut des Mathématiques pour la Planète Terre, et devrait être proposé comme sujet de thèse de doctorat sous peu.

- [1] N.Cornette. [Impact du changement climatique sur les ressources en eau de subsurface à l'horizon 2050-2100 dans un contexte de milieu de socle cristallin](#). Thèse de doct. Université de Rennes 1, 2022.
- [2] A. Richts, W. F. Struckmeier et M. Zaepke. "WHYMAP and the Groundwater Resources Map of the World 1 :25,000,000". In : *Sustaining Groundwater Resources : A Critical Element in the Global Water Crisis*. Sous la dir. de J. Anthony A. Jones. Dordrecht : Springer Netherlands, 2011, p. 159-173. isbn : 978-90-481-3426-7. doi : 10.1007/978-90-481-3426-7_10.
- [3] J.-C. Roux. *Aquifères et eaux souterraines en France - Ouvrage collectif sous la Direction de Jean-Claude Roux*. Sous la dir. de J.-C. Roux. BRGM Editions, 2006.
- [4] I. Shiklomanov. "World fresh water resources". In : *Water in Crisis : A Guide to the World's Fresh Water*. Sous la dir. de P. H. Gleick. Oxford University Press, 1993.
- [5] Allier, D., Mougin, B., Seguin, J.-J., 2015. [Caractérisation hydrogéologique des entités BDLISA](#) délimitées en zone de socle et transposition de l'information sur la carte hydrogéologique de la France.
- [6] Chantraine, J., Rabu, D., Béchenec, F., 2002. Carte géologique numérique à 1: 250 000 du Massif armoricain. Version 1.1.

Illustration 3 : Impact des antibiotiques vétérinaires sur le devenir de l'azote dans les bassins versants

Camille Vautier (ENS Rennes et UMR Géosciences Rennes), Annet Laverman (CNRS et UMR Ecobio)

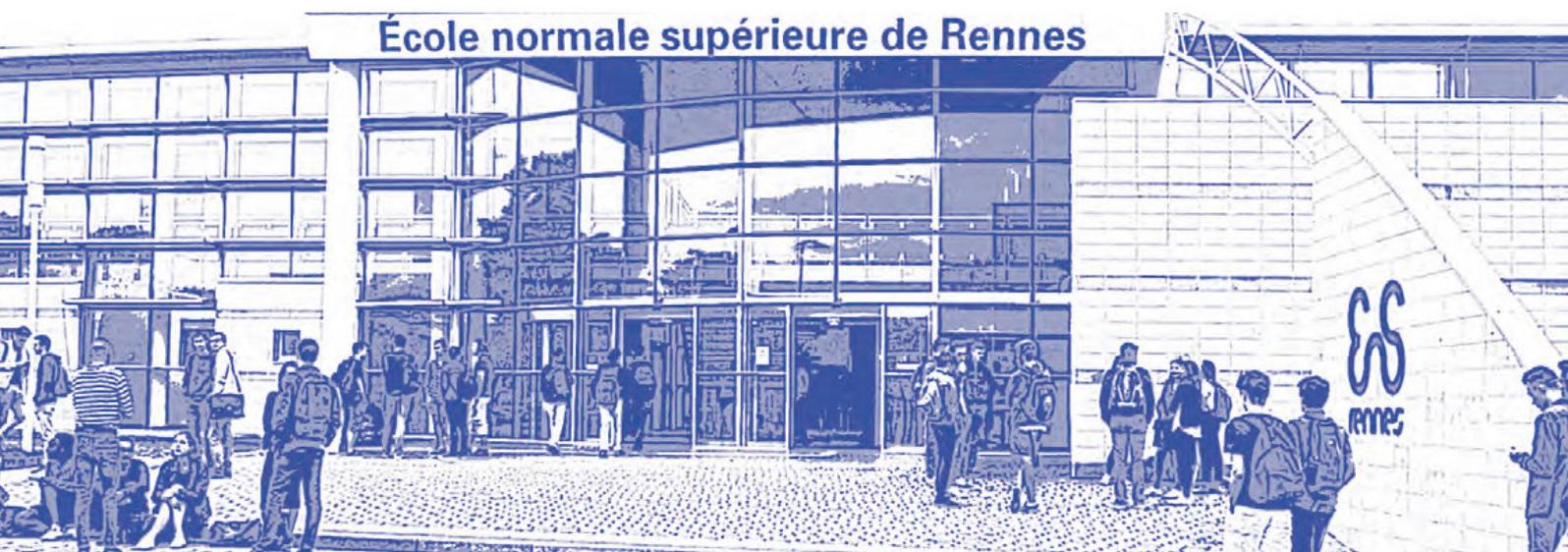
Après une intensification massive de l'agriculture dans la seconde moitié du XX^e siècle, à l'origine d'un développement social considérable mais aussi de pollutions du sol et des eaux¹, les zones rurales sont, aujourd'hui, à la recherche d'un équilibre entre production agricole, santé et environnement. Ce projet s'intéresse au devenir de deux grands contaminants issus de l'élevage intensif, les nitrates et les antibiotiques vétérinaires, depuis leur pénétration dans l'environnement lors de l'épandage d'excréments animaux sur les champs, jusqu'à leur arrivée à la mer, en passant par le sol, les nappes souterraines, les zones humides, les rivières.

Les antibiotiques vétérinaires entrent dans les bassins versants par le même biais que les nitrates, l'épandage d'excréments animaux². Conçus pour lutter contre les bactéries pathogènes, ils peuvent, une fois libérés dans l'environnement, impacter des bactéries différentes de leur cible initiale. Des études montrent que certains antibiotiques vétérinaires peuvent perturber le métabolisme des bactéries dénitrifiantes qui participent à l'élimination naturelle d'une partie des nitrates dans les bassins versants³. Cet effet néfaste des antibiotiques sur les bactéries dénitrifiantes pourrait limiter l'épuration naturelle de l'eau. Néanmoins, l'action réelle des antibiotiques dans le milieu naturel reste à évaluer. Les concentrations en antibiotiques dans le milieu naturel sont-elles suffisantes pour avoir un effet sur les bactéries dénitrifiantes ? Le temps d'exposition dans l'aquifère est-il à l'origine d'un effet à long terme des antibiotiques sur les bactéries du sol et de l'aquifère ? Quel est l'effet global des antibiotiques vétérinaires sur le cycle de l'azote ?

La méthodologie combine différentes approches : mesures chimiques sur le terrain, expériences de microbiologie en laboratoire, modélisation hydrogéologique. Elle s'appuie ainsi sur les compétences

complémentaires de deux unités de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR), l'UMR Géosciences Rennes et l'UMR Ecobio. A l'échelle du site universitaire rennais, ces recherches s'intègrent pleinement dans l'esprit du projet France 2030 site d'excellence IRIS-E (Interdisciplinary Research and Innovative Solution for Environmental Transition). Ce projet s'inscrit dans la forte dynamique locale visant à faire du bassin rennais un site pilote sur la question de la qualité de l'eau, question au cœur des défis sociétaux et environnementaux actuels. En analysant l'interaction de deux polluants de nature chimique très différente, souvent étudiés par des communautés scientifiques distinctes, ce projet envisage de façon globale les pollutions d'origine agricole. Il permet de faire le lien entre un nutriment, l'azote des nitrates, identifié comme responsable de l'eutrophisation des zones côtières depuis les années 1980⁴, et des résidus médicamenteux, les antibiotiques, catégorisés comme polluants émergents ². Il s'inscrit dans le concept "One Health" (une seule santé), en analysant les risques causés par une pratique d'amélioration de la santé animale (administration d'antibiotiques vétérinaires) sur la santé environnementale (eutrophisation des eaux) et la santé humaine (qualité de l'eau potable).

1. Moss B. Water Pollution by Agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363 (2008). [doi:10.1098/rstb.2007.2176](https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2176)
2. Charuaud, L. *et al.* [Veterinary pharmaceutical residues in water resources and tap water in an intensive husbandry area in France](#). *Science of The Total Environment* 664 (2019).
3. Roose-Amsaleg, C. & Laverman, AM. [Do antibiotics have environmental side-effects? Impact of synthetic antibiotics on biogeochemical processes](#). *Environ Sci Pollut Res Int* 23 (2016).
4. Menesguen, A. & Salomon, J. C. in *Computer modelling in ocean engineering* 443-450 (Venice, 1988).



Ecole normale supérieure de Rennes
Campus de Ker Lann - 11 avenue Robert Schuman - 35170 BRUZ - France
Tél. : +33 2 99 05 93 00 | www.ens-rennes.fr