



Rédigé le 09 mars 2026



15 minutes de lecture



Actualités

Recherche fondamentale



Face à la complexité croissante des problématiques et des approches scientifiques, la recherche et l'innovation requièrent plus que jamais des compétences de pointe qu'il est nécessaire d'associer dans une démarche multidisciplinaire.

Le modèle d'IFPEN repose depuis longtemps sur ce principe, comme en atteste la diversité des compétences qu'il héberge, mais la « diversification » de ses domaines d'intervention n'a fait qu'en accroître l'exigence.

Cette évolution de notre spectre applicatif impose que l'on soit aussi en mesure de saisir le potentiel

d'accélération qu'apporte l'ouverture à d'autres équipes de recherche. Ceci a donc conduit notre institut à renforcer sa logique partenariale, aussi bien avec le monde académique qu'industriel. Cette recherche collaborative s'inscrit dans un cadre à la fois national, européen et international et traduit également une volonté de contribuer aux écosystèmes en place pour faire progresser la connaissance.

Elle s'opère suivant diverses modalités, plus ou moins formalisées et positionnées dans la durée, que ce numéro de Science@ifpen va vous permettre de découvrir : depuis des collaborations ciblées jusqu'à de véritables organisations co-pilotées, en passant par des consortia de recherche, des réseaux scientifiques ou diverses formes d'accueil et d'encadrement de doctorants.

Très bonne lecture,

**Xavier Longaygue**

Responsable des partenariats de recherche

Direction scientifique



# LES BRÈVES

Co-piloté par IFP Energies nouvelles (IFPEN) et l'Université Gustave Eiffel, le PEPR MOBIDEC « Digitalisation et Décarbonation des Mobilités » s'inscrit au cœur du plan France 2030 (Figure 1). Ce programme ambitieux vise à mobiliser l'excellence scientifique nationale pour transformer durablement les transports en France. En s'appuyant sur des recherches fondamentales (TRL<sup>1</sup> 1 à 4), MOBIDEC cherche à comprendre, anticiper et simuler les mobilités des biens et des personnes afin d'offrir des outils d'aide à la décision aux pouvoirs publics et aux acteurs industriels.

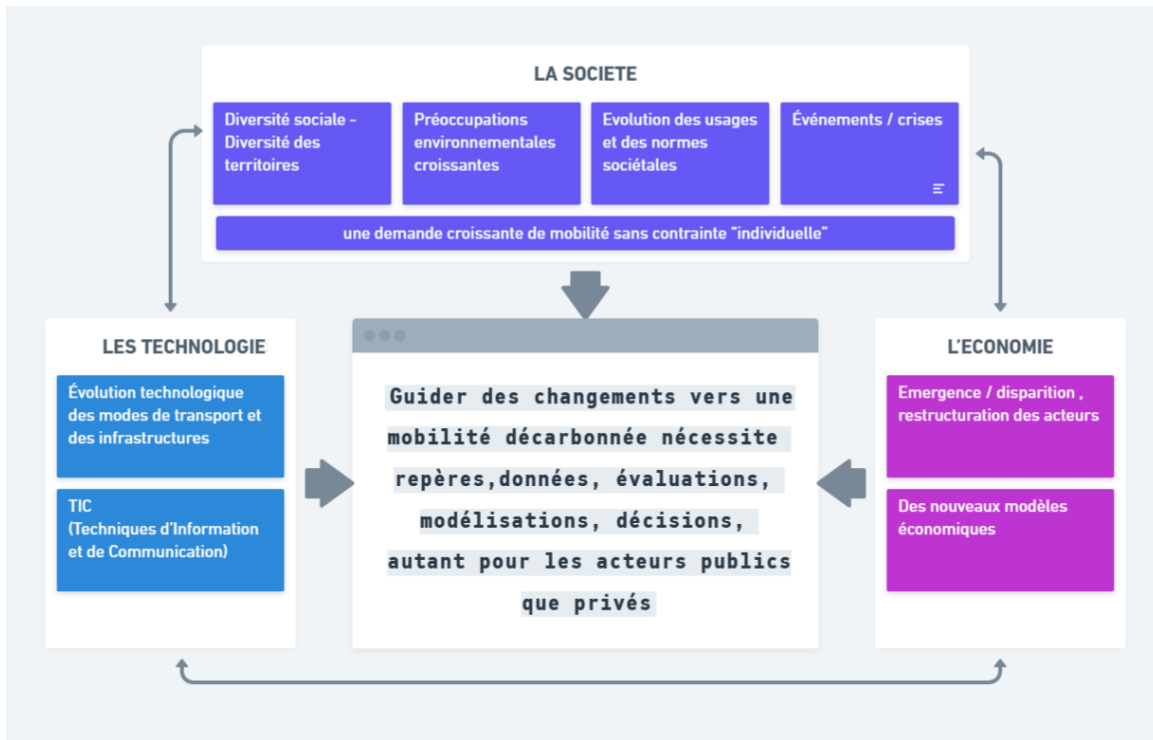


Figure 1 : Enjeux et objectifs du PEPR MOBIDEC

Le programme s'articule autour de trois axes complémentaires portés par des projets ciblés (Figure 2) : **FORBAC** pour la prévision d'impacts et la prise de décisions optimales, **MiDMoB** pour la production de données sur les comportements des individus, et **Mob Sci-Dat Factory**, véritable socle technologique dédié au partage d'outils d'analyse de la mobilité.

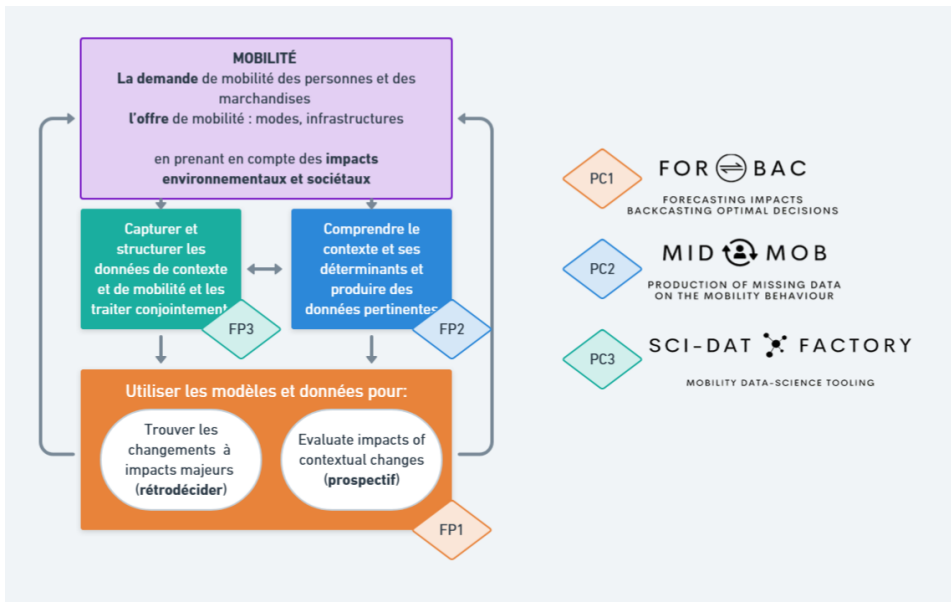


Figure 2 : Structure du PEPR MOBIDEC

## Zoom sur Mob Sci-Dat Factory : la « fabrique » de la donnée de mobilité

Le projet **Mob Sci-Dat Factory** (2023-2027) est co-porté par IFPEN et l'Inria. Son objectif est majeur : structurer **une plateforme sécurisée de partage et de mutualisation** pour les chercheurs et experts de la mobilité.

L'enjeu n'est pas seulement de collecter des données, mais de résoudre les questions complexes liées à **leur accessibilité, leur hétérogénéité et leur qualité**. Pour ce faire, Mob Sci-Dat Factory héberge le développement d'outils destinés à traiter, analyser et extraire des connaissances exploitables à partir de masses de données souvent fragmentées (Figure 3).

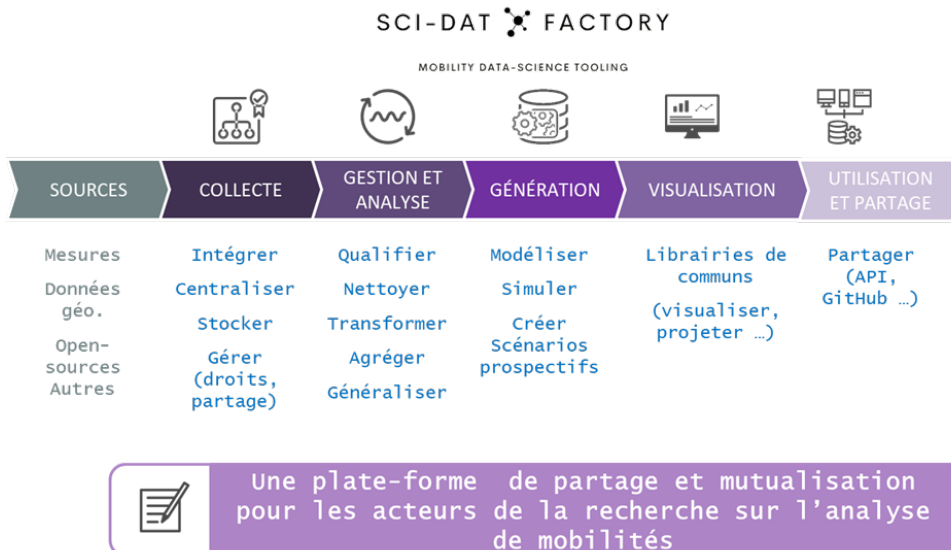


Figure 3 : Activités portées par la plate-forme Mob Sci-Dat Factory

## Un socle technologique de pointe

La plateforme repose sur un écosystème d'outils performants permettant d'automatiser le cycle de vie de la donnée :

- **Collecte et stockage sécurisés** (conformes au RGPD) et connexions à des espaces de données existants<sup>2</sup>
- **Traitement automatisé** des flux de données grâce à [Apache Airflow](#) et [Kubernetes](#)
- **Enrichissement** par des modèles de visualisation et de calcul d'indicateurs d'accessibilité aux transports
- **Partage communautaire** via un [portail dédié](#), construit avec les deux environnements complémentaires [Huwise](#) et [CKAN](#), et incluant également un forum Discourse, un Wiki et des catalogues de codes sur GitHub et l'utilisation communautaire de la plate-forme

## Une vitrine technologique : le Data Challenge NetMob25

L'une des réalisations emblématiques du projet est le **NetMob25 Data Challenge**. Ce défi scientifique utilise un jeu de données GNSS<sup>3</sup> massif de **500 millions de points**, couvrant les déplacements de plus de 3 300 individus en Île-de-France. Cet exemple concret illustre la capacité de la plateforme à gérer des volumes importants tout en assurant la confidentialité des données. Plus de 60 équipes de recherche internationales utilisent déjà ces ressources pour comprendre et analyser la mobilité et ses impacts en Ile de France.

## IFPEN au cœur de l'innovation

L'implication d'IFPEN dans Mob Sci-Dat Factory témoigne de son expertise conjointe en **sciences des données et en modélisation des systèmes de transport**. Plusieurs thèses et post-doctorats sont actuellement menés au sein de l'institut dans le cadre du PEPR, portant par exemple sur l'apprentissage profond pour la prédiction des flux urbains ou le développement de modèles de simulation de trafic comme [MATSim](#).

En fournissant une base commune et évolutive, Mob Sci-Dat Factory ne se contente pas de livrer un produit fini ; il bâtit **une communauté scientifique** capable de transformer les données brutes en leviers concrets pour la décarbonation, comme des modèles ou des outils.

<sup>1</sup> Technology Readiness Level : échelle employée pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie

<sup>2</sup> Comme le Point d'Accès National aux données de transport (<https://transport.data.gouv.fr/>)

<sup>3</sup> Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites

**Contacts scientifiques : Alexandre Chasse, Gilles Corde**

**>> NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN**

PEPR MOBIDEC : la donnée au service de la décarbonation des mobilités



**Les zones karstiques sont des réseaux complexes de conduits souterrains résultant de la dissolution de roches pouvant atteindre des centaines de km. Leur réaction au changement climatique est primordiale compte tenu de leur importance pour l’adduction en eau douce (environ 20% de la population mondiale concernée), mais aussi de leur rôle tampon dans les événements climatiques extrêmes appelés à se multiplier. Ainsi des crues éclair peuvent se produire dès lors que l’ensemble des conduits est saturé, avec toutes les conséquences qui s’ensuivent. Par ailleurs, du côté du transport des polluants, la présence des conduits peut changer drastiquement leurs temps d’arrivée dans des zones habitées, avec un impact fort sur les capacités à endiguer les conséquences.**

Le projet KARST est un projet financé par l’ERC<sup>1</sup> sur une durée de 6 ans, en tant que lauréat de l’édition 2022 de l’appel d’offre Synergy, destiné à des projets collaboratifs entre académiques. Les équipes partenaires (IDAEA- CSIC<sup>2</sup> Espagne, universités de Ljubljana et de Neuchâtel, IFPEN) sont pilotées par quatre chercheurs principaux<sup>3</sup> rattachés à ces entités, respectivement Marco Dentz, Bojan Mohar, Philippe Renard et Benoit Noetinger dont les spécialités se complètent<sup>4</sup>.

L’objectif de ce projet est de construire des modèles numériques de ces systèmes karstiques, de caractériser leurs réseaux en les cartographiant, puis en y décrivant les écoulements à différentes échelles depuis celle du conduit jusqu’à celle du réseau tout entier.

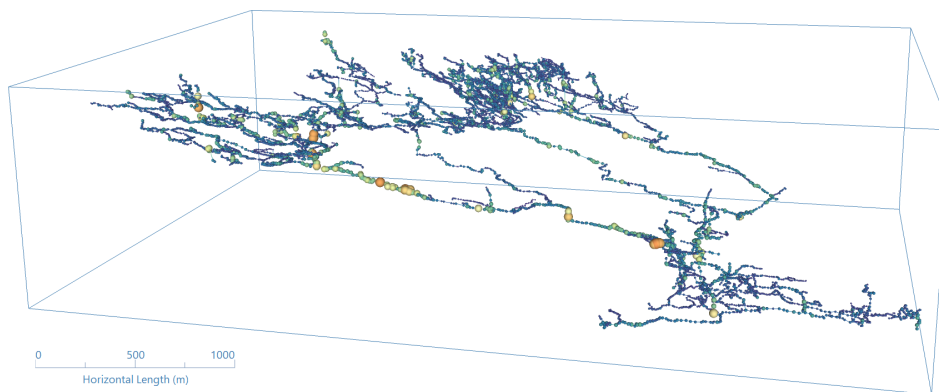


Figure 1 : exemple de système karstique

On doit donc pouvoir caractériser ces réseaux en les cartographiant, savoir y décrire les écoulements tant à l’échelle du conduit qu’à l’échelle du réseau tout entier. La démarche suivie est multiéchelle, allant de la caractérisation des conduits individuels, de leur réseau, de leur couplage avec la roche environnante et les forçages extérieurs. In fine on s’intéresse aussi à la genèse de ces réseaux de façon à trouver des descripteurs pertinents de leur organisation spatiale.

Au sein d’IFPEN, des expériences d’écoulement sont conduites la direction « Mobilité et Systèmes » sur des maquettes imprimées en 3D, qui sont la réduction de conduits réels scannés par des

techniques LIDAR<sup>5</sup>. Les champs de vitesse, et les relations débit/perte de charge  $y$  sont mesurés et confrontés à des résultats de simulation numérique (CFD<sup>6</sup>) réalisés sur les mêmes conduits. Une première conclusion est que les modèles empiriques employés jusqu'alors par les chercheurs dans la simulation numérique, et qui sont issus de conduits lisses et droits, s'avèrent très peu précis dans la présente situation.

Une autre équipe, dans la direction « Sciences et technologies de l'environnement », s'intéresse au traitement des écoulements dans l'ensemble du réseau, en prenant en compte les incertitudes inhérentes au manque de données exhaustives. Ce travail exploite des acquis IFPEN en matière de changement d'échelle, issus des modèles d'écoulements dans les aquifères ou les réservoirs pétroliers, pour les transposer sur des réseaux de conduits. A grande échelle, ces réseaux peuvent être décrits à l'aide de graphes, c'est à dire par un réseau de nœuds représentant les intersections entre les conduits, reliés par des liens dont la conductivité agrège l'influence des caractéristiques du conduit considéré (longueur, diamètres, rugosité, tortuosité, etc.).

Ceci requiert alors la résolution de grands systèmes linéaires, avec des matrices associées qui sont reliées aux conductivités des conduits. Toutefois ces conductivités sont mal connues car difficiles à mesurer sur le terrain. On doit donc en proposer des estimateurs fiables : c'est ce qu'on appelle la prise de moyenne. On a pour cela établi des formules de prise de moyenne des conductivités, sous forme de lois de puissance dont l'exposant dépend de la connectivité du réseau de conduits sous-jacent [1]. Il s'avère en définitive que la conductivité effective d'un conduit plutôt isolé se « moyenne » avec une moyenne harmonique<sup>7</sup>; en revanche s'agissant d'un conduit très connecté il s'agira plutôt de la moyenne arithmétique toute simple. Ces techniques permettent de laisser de côté les incertitudes liées à la connaissance imparfaite de la conductivité de tous les conduits.

Par ailleurs, dans le but d'alléger les calculs, une réduction de modèle a été mise en place par l'emploi de méthodes spectrales<sup>8</sup> qui permettent d'agréger les nœuds du réseau sans recourir à une notion de proximité spatiale. Ce volet du projet a pour but ultime de faire la jonction avec les modèles de type « boîtes noires », employés par les exploitants de terrain, lesquels sont suffisants en routine mais peu prédictifs lors des événements météorologiques extrêmes concernés par le projet KARST.

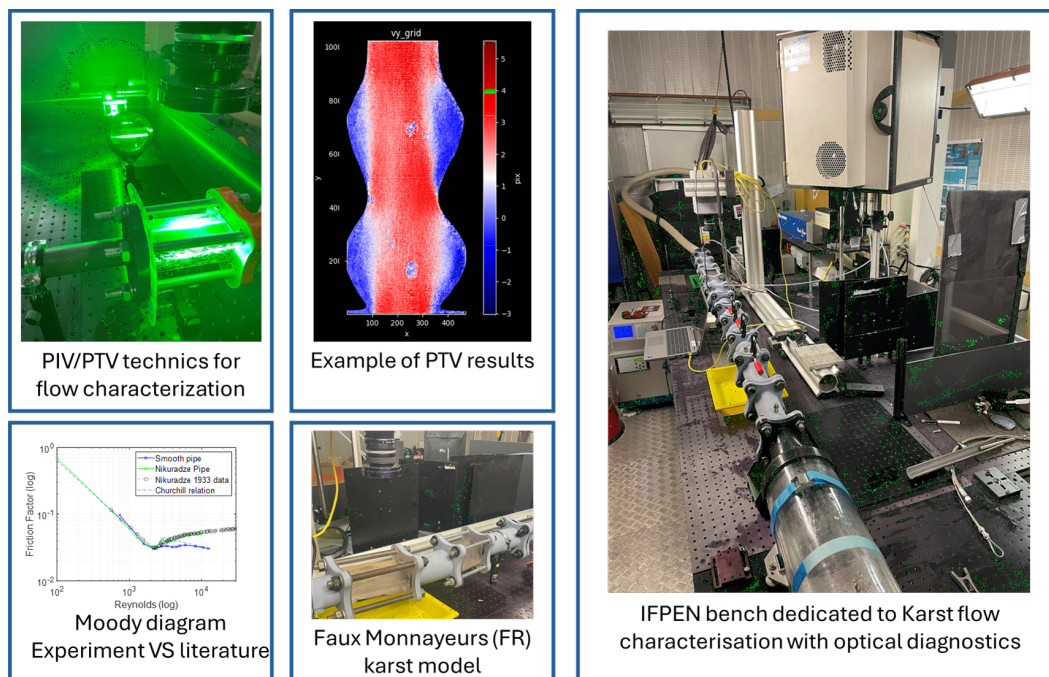


Figure 2 : moyens dédiés à l'étude des karsts

La compréhension de la formation des conduits est un autre aspect du travail qui va s'appuyer sur l'expertise reconnue d'IFPEN en modélisation analogique pour réaliser à terme des maquettes physiques de karst en laboratoire.

Enfin, les résultats du projet feront l'objet de mises en œuvre sur le « terrain », en interaction étroite avec les actions du [projet K3](#) et la [chaire GeEAUde](#) dont IFPEN est partenaire.

En résumé, le projet KARST réunit des chercheurs de pays et de cultures scientifiques différents sur une durée longue et avec des moyens bien en rapport avec les enjeux de recherche concernés. En plus de la collaboration, il permet à IFPEN d'accueillir deux doctorants et des post-doctorants, tout en développant des moyens expérimentaux dédiés, comme des techniques de visualisation originales des écoulements. Des séjours scientifiques de courte, moyenne ou longue durées d'une équipe chez une autre ont permis d'enrichir les échanges et de trouver parfois des solutions originales à des questions scientifiques. L'effet de levier entre équipes joue à plein, bien dans l'esprit « Synergy ».

<sup>1</sup> European Research Council

<sup>2</sup> Institut d'évaluation environnementale et de recherche sur l'eau- Conseil National de la Recherche Espagnol

<sup>3</sup> Principal Investigators (PI)

<sup>4</sup> Transport dans les écoulements géologiques, théorie des graphes, géosciences de terrain et modélisation, changement d'échelle

<sup>5</sup> Imagerie, détection et télémétrie laser

<sup>6</sup> Computational Fluid Dynamics

<sup>7</sup> Moyenne calculée en prenant la réciproque de chaque valeur, en trouvant la moyenne arithmétique de ces réciproques, puis en prenant la réciproque du résultat.

<sup>8</sup> Ces méthodes consistent à s'intéresser aux valeurs propres de ces matrices, que des méthodes modernes permettent d'estimer très rapidement. On montre que les plus petites valeurs propres correspondent à des variations à grande échelle des écoulements, celles qui nous intéressent le plus

dans ce projet. Ces techniques permettent de regrouper les nœuds de façon optimale.

**Référence :**

[1] Colecchio, I., Le Gall, E., & Noetinger, B. (2025). ***Effective conductivity of conduit networks with random conductivities***. Physical Review E, 112(1), 014309.

>> DOI : <https://doi.org/10.1103/wb8q-xv3x>

Contact scientifique : **Benoît Noetinger**

>> **NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN**

Les karsts : des systèmes cruciaux pour notre avenir qui mobilisent des compétences de haut niveau

**Créé en 2011, le réseau international ECN (Engine Combustion Network) fédère des laboratoires de recherche autour de la compréhension fondamentale de l'injection de carburants, du mélange air/carburants et de la combustion [1]. Centré sur les carburants fossiles, avec des configurations de référence Diesel et essence, ECN s'est progressivement imposé comme un cadre scientifique structurant du domaine, pour la validation des approches expérimentales et numériques en combustion.**

Depuis lors, ces enjeux scientifiques ont été profondément renouvelés avec l'essor de thématiques liées à la transition énergétique comme **les carburants durables** (hydrogène, ammoniac, e-fuels) et **les systèmes de stockage électrochimique**. Ceux-ci introduisent notamment des phénomènes multi-physiques complexes, encore imparfaitement compris, ce qui, à ce stade, empêche l'établissement de modèles prédictifs robustes. Comme par le pas avec les carburants fossiles, l'un des principaux verrous réside dans **le manque de données de référence partagées et de protocoles expérimentaux standardisés**, indispensables pour comparer les résultats et progresser collectivement.

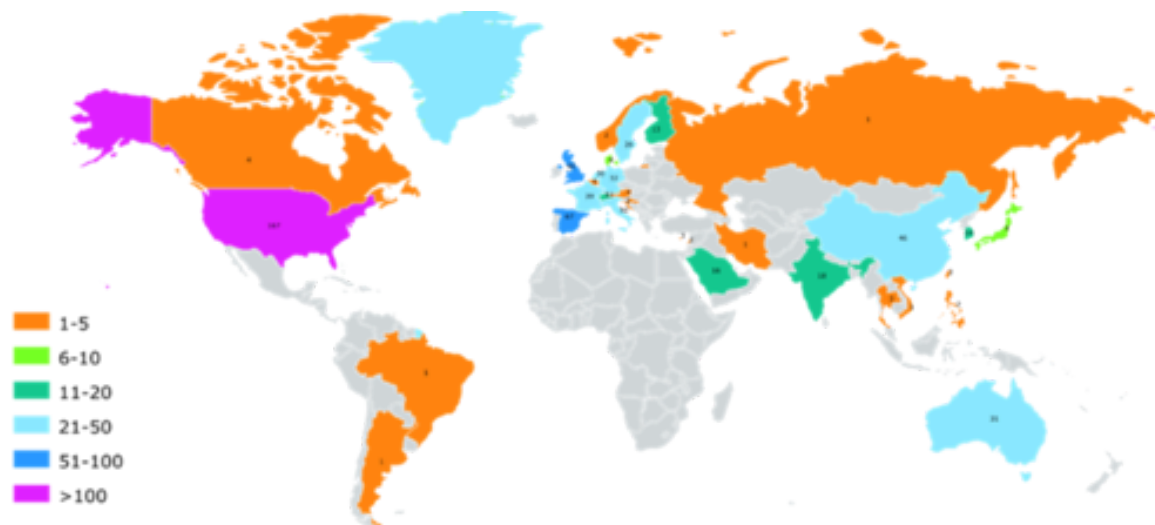
Face à ces enjeux, le réseau ECN a engagé en 2022, lors de son **workshop annuel, une réorientation stratégique majeure**, adaptant son périmètre aux carburants durables et à l'emballement thermique des batteries [2]. Cette évolution s'appuie sur la méthodologie fondatrice d'ECN : définition de cas de référence, acquisition multi-diagnostics<sup>1</sup> de données expérimentales et confrontation systématique avec des simulations numériques multi-échelles.

Le **10<sup>e</sup> workshop ECN**, tenu en décembre 2024 à Chiba (Japon), a permis d'évaluer l'état de maturité scientifique de ces nouvelles thématiques.

Il en ressort que les travaux du réseau ECN ont conduit à des avancées significatives sur :

- la combustion de carburants durables en allumage commandé et par compression, en apportant des éléments de compréhension sur le rôle clé du mélange local et de la vaporisation sur la cinétique basse température ;
- l'injection d'hydrogène et d'ammoniac, avec une meilleure compréhension des effets thermiques et du flash-boiling<sup>2</sup>;
- **l'emballement thermique des batteries**, désormais thématique structurante du réseau, grâce à une caractérisation expérimentale multi-techniques (imagerie, mesure de température et de pression, caractérisation des gaz émis lors du venting<sup>3</sup>) et au développement de modèles numériques de référence.

L'impact scientifique du réseau est confirmé par une **étude bibliométrique récente** (Figure) : entre 2010 et 2025, ECN a donné lieu à **près de 390 publications indexées dans le Web of Science**, impliquant environ **200 laboratoires contributeurs**, tandis que **plus de 800 laboratoires dans le monde** citent et utilisent ces travaux. Malgré les inflexions thématiques, cette production est restée stable depuis 2016 (30 à 40 articles par an), tandis que **la visibilité scientifique continue de croître, avec un indice h atteignant 46 en 2025.**



Carte mondiale de la répartition des publications ECN (étude bibliométrique 2025)

Dans la vie de ce réseau scientifique, **IFP Energies nouvelles joue un rôle central dans l'animation**, mais aussi en contribuant à la structuration des nouvelles thématiques, en particulier sur les batteries, et en participant activement à la construction de bases de données et de cadres de modélisation de référence [2, 3].

Quinze ans après sa création, le réseau ECN démontre **sa maturité scientifique, sa capacité d'adaptation et son impact international croissant**. En étendant son approche collaborative aux carburants durables et à la sécurité des batteries, ECN constitue aujourd'hui **un outil clé pour la recherche amont sur les systèmes énergétiques de demain**.

<sup>1</sup> Emploi simultané de plusieurs techniques de mesure avancées, souvent optiques, pour observer et quantifier différents phénomènes physiques

<sup>2</sup> Vaporisation rapide d'un liquide provoquée par une chute brutale de pression sous sa pression de saturation

<sup>3</sup> Evacuation des gaz générés à l'intérieur d'une cellule de batterie dans des conditions anormales

## Références :

[1] [Engine combustion network webpage](#)

[2] Lecompte, M., Bardi, M., Richardet, L., Chevillard, S., Abada, S., Khaled, H., & de Persis, S. **Experimental characterization of the variability of the thermal runaway phenomenon of a li-ion battery**. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 6 (2023-24-0160), 1777-1787.

>> DOI : <https://10.4271/2023-24-0160>

[3] Richardet, Bardi, M., Lecompte, M., & de Persis, S. **Online Characterization of Gas Emissions from 21700 NMC811/Graphite Battery Cells: Effects of State of Charge and Surrounding Atmosphere**, Journal of Energy Storage, 2026 (in review)

Contact scientifique : [Michele Bardi](#)

## >> NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN

Le réseau ECN : un cadre scientifique de référence au service des carburants durables et de la sécurité des batteries

**Le ruissellement de films liquides sur des surfaces complexes est une configuration que l'on trouve couramment dans des équipements de génie chimique (dans les lits fixes catalytiques, dans les colonnes à garnissages structurés des procédés de capture du CO<sub>2</sub>) mais aussi dans des systèmes énergétiques (pour le refroidissement des moteurs électriques ou dans des évaporateurs). La compréhension et la modélisation du comportement de ces films liquides ruisselants est primordiale pour permettre une meilleure analyse des phénomènes à l'œuvre et l'optimisation des différents systèmes concernés.**

Désireux de lancer un travail doctoral pour étendre et améliorer les modèles CFD<sup>1</sup> de films liquides qui reposent sur la librairie opensource [OpenFOAM](#), IFPEN a proposé au TUB (Technische Universität Berlin) de le réaliser en co-tutelle<sup>2</sup>. Le Process Dynamics and Operations Group, dirigé par le Pr. Jens Repke, est en effet renommé sur ces aspects et utilise le même logiciel de simulation numérique. La collaboration autour de cette thèse [1] permet donc de valoriser les bases de données expérimentales existantes des deux partenaires, et de les compléter par de nouvelles mesures de transfert de matière local.

Sur le plan expérimental, une nouvelle technique est en cours de développement au sein de l'équipe du Pr. Repke. Elle combine la mesure locale du transfert de matière, par fluorescence planaire induite par laser (PLIF), avec une mesure simultanée de la vitesse locale, par  $\mu$ -Stereo-PIV<sup>3</sup>. La méthode permettra d'obtenir des données plus précises et complètes pour la validation des simulations numériques, en particulier sur des configurations géométriques réelles de garnissages structurés.

La Fig. 1 montre deux exemples de simulations de films ruisselants, réalisés au cours de ce travail doctoral :

- D'un côté un film formant des ruisselets sur une plaque plane verticale, reproduisant les travaux de Laval et al. [2] ;
- De l'autre, un film s'écoulant sur une microstructure qui a été étudiée expérimentalement à TUB [3].

L'objectif ultime de la thèse est de disposer d'un jumeau numérique capable de prédire, par Simulation Numérique Directe (DNS), à la fois l'hydrodynamique et les transferts de matière dans un volume représentatif à petite échelle), en vue de les extrapoler vers un modèle simplifié à plus grande échelle. Pour cela seront utilisés les travaux d'une précédente thèse IFPEN [4], au cours de laquelle la méthode Volume-Of-Fluid (VOF) géométrique isoAdvector<sup>4</sup> a pu être étendue de manière consistante au transport d'espèces et au transfert de matière.

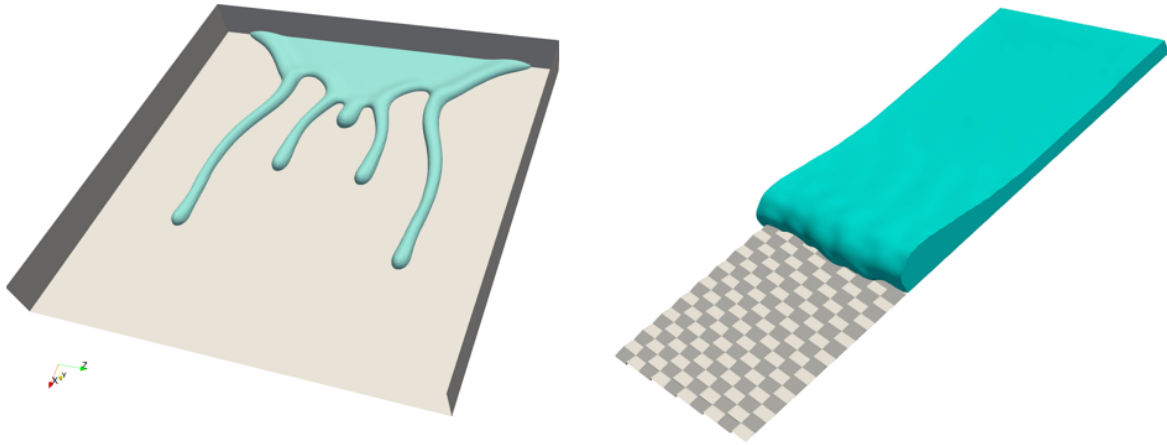


Figure 1 : Simulations de films liquides ruisselants reproduisant des travaux expérimentaux- Gauche : sur plaque plane, formant des ruisselets [1]. Droite : progressant sur une micro-structure [2]

<sup>1</sup> Mécanique des fluides numérique

<sup>2</sup> Le doctorant partage son temps à égalité entre Berlin et le site lyonnais d'IFPEN. Le Pr. Jens Repke, pour l'école doctorale de TUB, et Pascal Alix (IFPEN), pour l'école doctorale MEGA à Lyon, assurent la codirection de cette thèse

<sup>3</sup> Permettant de mesurer les 3 composantes de la vitesse dans le plan laser, à l'aide d'une seconde caméra visant la même zone

<sup>4</sup> Disponible dans la bibliothèque opensource OpenFOAM

## Références :

[1] T. Campos “**Modelization of falling liquid films over complex surfaces**”, Thèse Université de Lyon - Technische Universität Berlin, 2024-2027.

[2] G. Lavalley, J. Sebilliau, and D. Legendre. “**Rivulet cascade from falling liquid films with side contact lines**”. Phys. Rev. Fluids, 5:124001, Dec 2020,  
>> DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.124001>

[3] S. J. Gerke and J.-U. Repke, “**Experimental investigations of the fluid dynamics in liquid falling films over structured packing geometry**” Chemical Engineering Research and Design, 2019,  
>> DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.05.043>

[4] Alexis Tourbier, Lionel Gamet, Philippe Béard, Typhène Michel, Joelle Aubin, Hrvoje Jasak, “**A consistent methodology to transport a passive scalar with the geometric Volume-of-Fluid method isoAdvector**”, Journal of Computational Physics, Volume 513, 2024  
>> DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2024.113198>

**>> NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN**

Modélisation des films liquides ruisselant sur des surfaces complexes - Une thèse en cotutelle avec TU-Berlin

Le Consortium Industrie Recherche pour l'Optimisation et la QUantification d'incertitude pour les données Onéreuses (CIROQUO) réunit depuis 2021 des partenaires académiques et technologiques autour d'un objectif commun : résoudre des problèmes liés à l'exploitation de simulateurs numériques qui traitent de phénomènes complexes, avec des temps de calcul pouvant s'étendre sur plusieurs heures ou journées. Le consortium vise plus particulièrement à développer des méthodes mathématiques pour traiter des sujets tels que la construction de modèles de substitution de codes numériques impliquant des données complexes (données fonctionnelles ou vectorielles par exemple), la compensation d'erreurs dans la calibration de codes successifs ou l'apprentissage de modèles de substitution hybrides (avec prise en compte de la physique). Ces outils sont essentiels pour mener des études d'optimisation, d'inversion ou de calibration en présence d'incertitudes, tout en réduisant significativement le coût de calcul, pour la conception de machine électriques, l'éolien ou encore les études liées au stockage géologique du CO<sub>2</sub>.

Une thèse réalisée à IFPEN [3] fournit un bon exemple de réalisation dans le cadre du consortium CIROQUO. Son objectif était de proposer une méthodologie de sélection de variables pour des plans d'expériences physiques et numériques dédiés à la calibration de modèles pour des simulateurs coûteux. Cette thèse a permis d'introduire une méthode séquentielle [4] incluant de nouveaux critères de sélection de plan d'expériences physiques et numériques optimaux.

Un algorithme d'optimisation combinant une méthode heuristique et une approche séquentielle a également été proposé [3]. Pendant la thèse, les développements ont été appliqués à la calibration d'un modèle de réservoir de stockage de CO<sub>2</sub>, comme illustré sur la Figure 1. La méthodologie proposée a été utilisée a posteriori pour le placement optimal de capteurs pour la calibration d'un modèle numérique d'éolienne flottante.

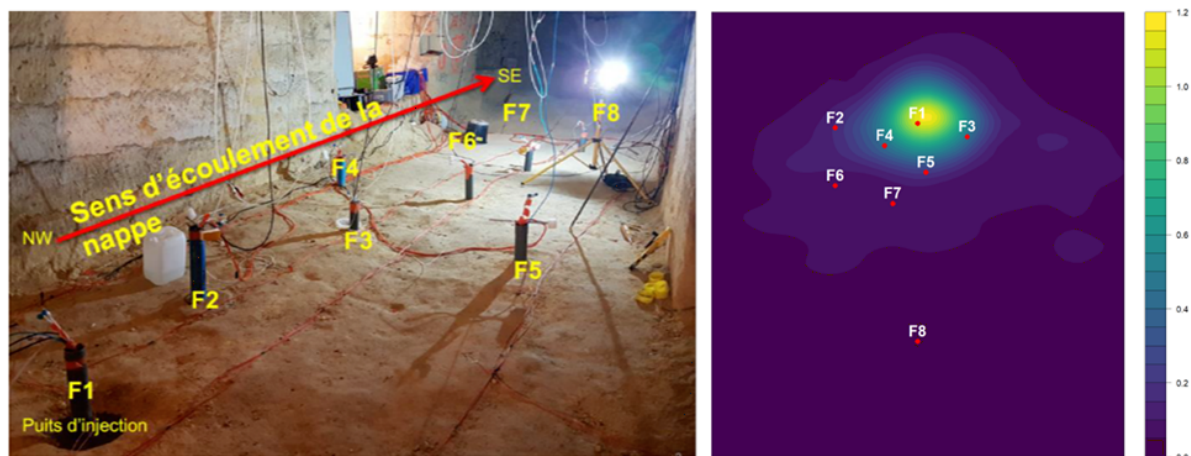


Figure 1 : Exemple de puits d'observations de niveaux de CO<sub>2</sub> dans un réservoir (Gauche) Dispositif expérimental. (Droite) Placement optimal des puits d'observation.

S'appuyant sur l'expérience acquise lors de partenariats précédents [1, 2], le consortium s'appuie sur une gouvernance collégiale pour définir les pistes de travail et répartir ses ressources. Ce fonctionnement collaboratif est renforcé par des journées scientifiques semestrielles, favorisant le partage des avancées des différents travaux, l'émergence de nouveaux partenariats et l'identification

de pistes de recherche prometteuses.

De manière générale, les travaux de CIROQUO ont déjà délivré des avancées sur différents aspects de l'analyse des simulateurs numériques, permettant d'envisager de nouveaux cas d'application et de nouveaux défis - tels que l'optimisation robuste de codes coûteux (avec présence de plusieurs versions) pour la conception de machines électriques - qui seront abordés sur la durée du consortium.

## Références :

[1] Christophette Blanchet-Scalliet, Céline Helbert, Delphine Sinoquet, Miguel Munoz Munoz Zuniga, Rodolphe Le Riche, et al.. **Activity report ciroquo research & industry consortium**. Ecole Centrale de Lyon; Mines Saint-Etienne; Université Toulouse 3 (Paul Sabatier); Stellantis France; BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières); CEA; IFP Energies Nouvelles; Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire; Storengy; INRIA; CNRS. 2024, pp.1-11.

>> <https://hal.science/hal-04661116v1>

[2] Olivier Roustant, Rodolphe Le Riche, Josselin Garnier, David Ginsbourger, Yves Deville, et al.. **Chair in applied mathematics OQUAIDO Activity report**. [Research Report] Mines Saint-Etienne; Ecole Centrale Lyon; BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières); CEA; IFP Energies Nouvelles; Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire; Safran Tech; Storengy; CNRS; Université Grenoble - Alpes; Université Nice - Sophia Antipolis; Université Toulouse 3 (Paul Sabatier). 2021. ?hal-03217277v2?

>> <https://hal.science/hal-03217277v2>

[3] Adama Barry. **Plans d'expériences pour la calibration de codes de calculs coûteux. Applications [stat.AP]**. Université de Toulouse, 2025. Français. ?NNT : 2025TLSES068?.

>> <https://theses.hal.science/tel-05186532>

[4] A. Barry, F. Bachoc, S. Bouquet, M. Munoz Zuniga and C. Prieur (2024), Optimal Design of Physical and Numerical Experiments for Computer Code Calibration, submitted to IJUQ,

>> <https://inria.hal.science/hal-04615127v2>

Contact scientifique : Delphine Sinoquet, Miguel Munoz Zuniga

>> NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN

CIROQUO : un Consortium de Recherche pour une meilleure exploitation des simulateurs numériques



**Durant la dernière décennie, le déploiement de l'éolien offshore a bénéficié d'une réduction importante du coût des équipements, grâce à la croissance du marché et à la montée en échelle de la production. Toutefois des marges supplémentaires seraient possibles grâce à une meilleure maîtrise des incertitudes opératoires, permettant le recul du conservatisme dans les règles de conception.**

Face à cette perspective, le projet européen HIPERWIND auquel IFPEN a pris part, visait une meilleure compréhension de la physique complexe influençant la conception et le fonctionnement des grands parcs éoliens en mer en vue de permettre des économies de coût substantielles à leurs propriétaires et in fine aux consommateurs d'électricité.

Plus précisément, il a eu pour objectif de quantifier les différentes sources d'incertitudes dont celles sur les conditions environnementales, de manière à les propager jusqu'aux conditions de chargement mécanique sur les turbines et leurs fondations, et à les intégrer dans l'évaluation économique du design et de la maintenance des installations.

La quantification d'incertitudes a notamment été établie en comparant les résultats issus d'outils d'ingénierie, utilisés par les industriels, avec des simulations dites de haute fidélité<sup>1</sup> [1], [2]. La propagation de ces incertitudes avec des conséquences sur le design et la maintenance nécessitait de nouvelles méthodes pour calculer les probabilités de défaillances des composants d'éoliennes [4].

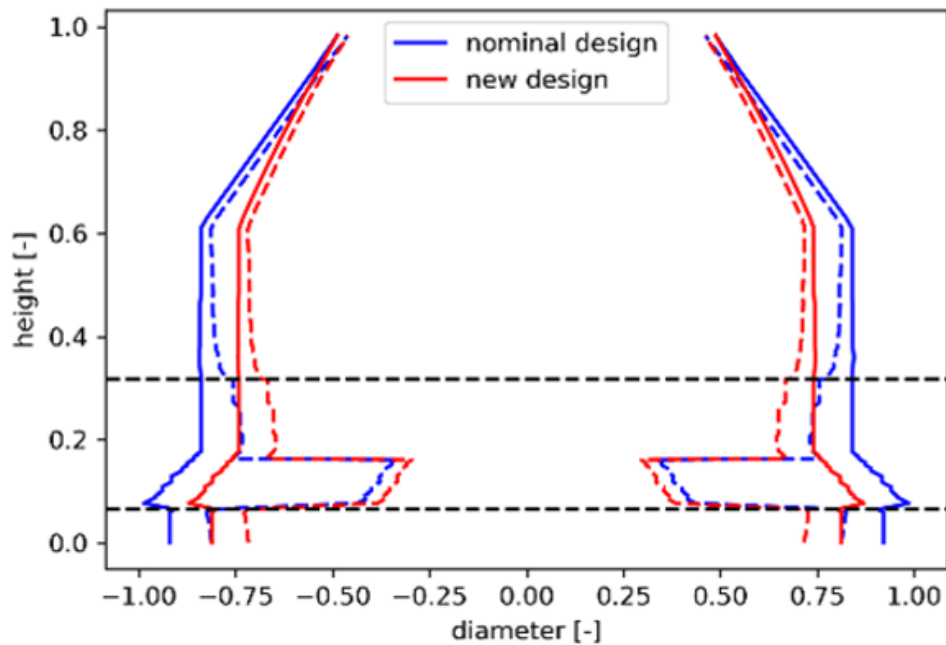
Le projet a développé une chaîne de modélisation efficace du chargement en fatigue des principaux composants (pales, tour et fondation), résultant de l'effet de sillage<sup>2</sup> dans une ferme éolienne [3], qui est utilisée dans les offres de [GreenWITS](#), la nouvelle filiale d'IFPEN.

HIPERWIND a produit de plus diverses avancées :

- sur le plan phénoménologique : la caractérisation de l'effet de la stabilité atmosphérique sur le comportement des sillages, et de l'effet de superposition de sillages de différentes turbines lorsque la direction du vent est défavorable par rapport à leur alignement [1] ;
- sur le plan de la conception : l'optimisation pour un cas d'étude d'une tour et de sa fondation monopieu, conduisant à une réduction de sa masse de 20% (figure 1) [4] ;
- sur le plan économique : une réduction d'environ 10 % du coût actualisé de l'énergie pour une ferme représentative, comptant 75 turbines de 8MW.

Au sein du projet HIPERWIND, IFPEN a associé ses compétences à celles de grands acteurs de la recherche : DTU, EDF, ETH Zürich, l'université de Bergen, le DNV et l'EPRI. Cette collaboration a été largement couronnée de succès et pose les bases pour de futures recherches d'intérêt dans le

domaine de l'éolien.



Part of the structure	Mass (initial design) [tons]	Mass (new design) [tons]
Monopile	71.62	55.76
MP+TP	226.52	176.34
Transition piece	139.62	108.69
Tower	139.31	114.10
<b>Total</b>	<b>557.08</b>	<b>454.89</b>

Figure 1 : Profil nominal (bleu) et optimisé (rouge) d'une éolienne avec fondation monopieu - Gain en dimension et en masse.

<sup>1</sup> Avec moins de simplifications des processus physiques modélisés

<sup>2</sup> Zone de déficit de vitesse et d'ajout de turbulence en aval d'une turbine



Le projet HIPERWIND a été financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne au titre de la Convention de subvention n° 101006689, et s'est déroulé pendant trois ans et demi. L'ensemble des données et publications issues du projet sont accessibles au public sur [le site web du projet](#).

## Références :

- [1] Ardillon, E., Bakhoday Paskyabi, M., Cousin, A., Dimitrov, N., Dupouiron, M. Eldevik, S., Fekhari, E., Ferreira, C., Guiton, M., Jezequel, B., Joulin, P.-A., Lovera, A., Mayol, L. and Penchah, M.R., **Turbine loading and wake model uncertainty**, D3-2, European Union. 2023, pp.145. (2023),  
>> <https://ifp.hal.science/hal-04096504>
- [2] Peyrard, C., Robaux, F., Borràs Nadal, A. and Joulin, P.-A., Mayol, M.-L., Eldevik, S., Guiton, M., Cousin, A., Benoit, M., Dimitrov, N. Lovera, A, Fereira, C., **Aero-servo-hydroelastic model uncertainty**, IFPEN; EDF; DTU; DNV. 2022, pp. Deliverable n° D3.3. (2022)  
>> <https://ifp.hal.science/hal-04033056>
- [3] Mc William, M., Bonfils, N., Dimitrov, N., Dou, S., (2022), **Wind farm parameterization and turbulent wind box generation**, DTU; IFPEN. 2022, pp. Deliverable n° D3.1  
>> <https://inria.hal.science/hal-04033050>
- [4] Cousin, A., Munoz Zuniga, M., Franceschini, L., Guiton, M., Agrell, C., Dimitrov, N. K., Gramstad, O., Marelli, S., Mc William, M., Schär, S., Vanem, E., Wang, H., Winter, S., Kelly, M., **Methods for efficient ULS reliability calculations and their impact on probabilistic design**, IFPEN; DTU; DNV; ETH Zurich (Suisse), (2024),  
>> <https://ifp.hal.science/hal-04836508>

Contacts scientifiques : [Martin Guitton](#), [Alexis Cousin](#), [Pierre-Antoine Joulin](#)

## >> NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN

Retour d'expérience du projet européen HIPERWIND sur la prise en compte des incertitudes dans l'éolien offshore

Thèse CIFRE de Charles TANO (EDF, Mines ParisTech, IFPEN) : « Méthodologie d'optimisation hybride pour la conception de vallées hydrogène »

**La production d'hydrogène bas carbone constitue une brique indispensable de l'ensemble des scénarios visant l'atteinte de la neutralité carbone. Néanmoins, un écart persiste entre les trajectoires de déploiement à grande échelle envisagées par ces scénarios et les réalités industrielles liées à l'implantation effective des infrastructures. Cet espace intermédiaire reste encore peu exploré dans la littérature scientifique ; il est au cœur des travaux menés dans cette thèse.**

S'appuyant sur le territoire de Dunkerque, cette recherche a consisté à développer une méthodologie innovante de couplage « doux » entre deux modèles d'optimisation bottom-up<sup>1</sup> complémentaires : le modèle de système énergétique européen MIRET-EU (IFPEN) et le modèle d'optimisation énergie-matière de site industriel PHOENIX (EDF – Mines ParisTech). Le couplage « doux » repose sur un processus itératif garantissant la convergence des résultats tout en préservant la cohérence propre à chaque outil.

Pour MIRET-EU, le couplage avec PHOENIX permet de mieux prendre en compte des contraintes territoriales locales — telles que la disponibilité du foncier, l'accès aux ressources en eau ou les capacités industrielles existantes — ainsi que des synergies potentielles entre procédés, susceptibles d'influencer significativement les trajectoires de décarbonation [1]. Réciproquement, ce couplage offre à PHOENIX une vision élargie du territoire, replacé dans les dynamiques nationales et européennes : évolutions de la demande en hydrogène et en électricité, arbitrages technologiques et échanges interrégionaux [2].

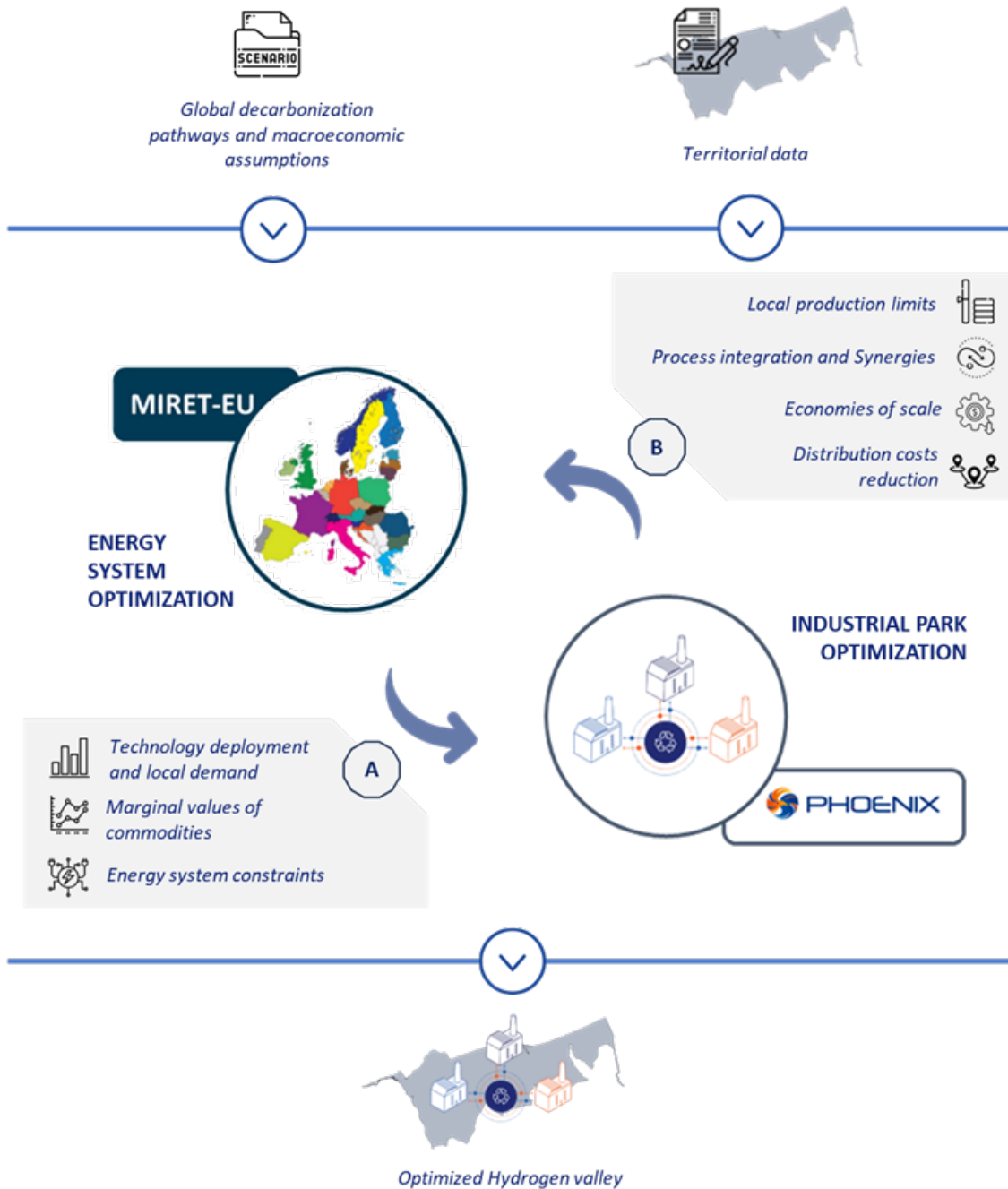


Figure 1 - Méthodologie de couplage doux entre les modèles MIRET-EU (IFPEN) et PHOENIX (EDF)

En combinant les approches des deux modèles, la méthodologie développée permet d'intégrer dans un cadre unifié des paradigmes habituellement traités séparément. Elle fournit ainsi des trajectoires de décarbonation locales cohérentes avec l'optimisation globale du système énergétique européen, et compatibles avec l'objectif de zéro émission nette à l'horizon 2050 (Figure 1). Les résultats obtenus identifient des voies de décarbonation spécifiques par sous-secteur économique, décrivent la dynamique de pénétration à long terme de l'hydrogène et de ses dérivés, et établissent des conditions limites réalistes pour les pôles industriels locaux. Ils constituent enfin une base robuste pour l'élaboration de stratégies de décarbonation territoriales alignées avec les contraintes de ressources et les opportunités de synergies industrielles.

Au-delà des résultats acquis, ce travail de thèse illustre le bénéfice de la recherche collaborative,

amplifié par le dispositif CIFRE, pour lequel le positionnement d'IFPEN, à l'interface des mondes académique et industriel, permet une synergie efficace entre le public et le privé.

<sup>1</sup> **Un modèle bottom-up** est une approche de modélisation dans laquelle le comportement global d'un système est construit à partir de la description explicite de ses composantes élémentaires et de leurs interactions. Il spécifie les mécanismes micro-économiques, physiques ou comportementaux sous-jacents, et laisse émerger les dynamiques agrégées du système par composition ou simulation.

#### Références :

[1] Tano, N. C.; Malbec, L.-M.; Zoughaib, A.; Le Bourdiec, S. (2024), ***Multi-resource integration associated with the deployment of hydrogen and derivatives in an industrial hub***, 37th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2024 (1), p. 60–71.

>> DOI : <https://doi.org/10.52202/077185-0006>

[2] Tano, N. C. ; Zoughaib, A. ; Le Bourdiec, S ; Malbec, L.-M. ; D'Herbement, V. (2025), ***Optimizing hydrogen deployment: a hybrid approach for coordinating hydrogen valley design with global energy systems and local constraints and opportunities***, 43rd IEW, International Energy Workshop, Jun 2025, Nara, Japan.

Contact scientifique : **Louis-Marie MALBEC**

>> **NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN**

Quand une thèse CIFRE éclaire le déploiement industriel de l'hydrogène

Durant près de 4 ans (mars 2020-février 2024), IFPEN a participé au projet CCIMC (Coordination Chemistry Inspires Molecular Catalysis), coordonné par le CNRS et financé par la commission européenne (H2020-MSCA-ITN-2019) [1]. Cet ITN (International Training Network) avait pour vocation d'améliorer nos connaissances dans les domaines de la conception de ligands<sup>1</sup> et de la chimie de coordination pour développer de nouveaux catalyseurs homogènes en considérant aussi bien leur mise en œuvre que leur recyclage. Ce consortium a impliqué 15 doctorants accueillis au sein de 9 universités de 7 pays européens différents (Figure 1). De plus, 8 partenaires du secteur industriel (ou assimilé) ont également été intégrés au projet grâce notamment aux détachements des doctorants au sein de ces sociétés pour une période le plus souvent de 3 mois.

La participation d'IFPEN à ce réseau était motivée par l'excellence des différents groupes de recherche européens impliqués ainsi que par la pertinence des thématiques abordées pour nos travaux en catalyse moléculaire, comme la métathèse des oléfines, le développement de nouveaux ligands, l'activation de petites molécules (CO<sub>2</sub>) ou encore le développement de nouvelles techniques d'immobilisation des catalyseurs homogènes<sup>2</sup> (liquides ioniques, nano-réacteurs polymériques ...). En tant que partenaire, IFPEN a contribué au projet de 3 doctorantes que nous avons accueillies sur notre site de Lyon, dans le département « Catalyse moléculaire » pour leur période de détachement :

- **W. Hudsai** : Activation du CO<sub>2</sub> par des hydrures de Mg (Coll. FSU<sup>3</sup> -Allemagne et LCC<sup>4</sup> - Toulouse).[2]
- **C. Abou-Fayssal** : Catalyse biphasique avec des nanoparticules métalliques greffées dans des nanoréacteurs polymériques (Coll. DTU<sup>5</sup> -Danemark et LCC-Toulouse)
- **D. Krishnan** : Hydrogénation sélective d'amides avec des nanoparticules métalliques immobilisées dans des liquides ioniques (Coll. DTU-Danemark et LCC-Toulouse).

Plusieurs événements ont également ponctué le projet au cours de ces quatre années dont 3 International Workshops, 2 Tutorials, 1 Core Course et 1 International School. C'est dans ce contexte qu'IFPEN a organisé et accueilli en 2022 le "2nd Tutorial" and the "4th Network Workshop", auxquels ont participé plus de 40 membres du consortium.

En intégrant ce réseau, IFPEN a accru sa visibilité au sein de la communauté de la catalyse moléculaire, ce qui est attesté par l'élaboration de nouvelles actions collaboratives avec certains des partenaires rencontrés. On peut citer le lancement d'un projet ANR avec le LCC Toulouse [3] ou encore la mise en place d'une nouvelle collaboration avec le DTU au Danemark, au travers d'un doctorat co-encadré qui débutera en 2026. [4]



Figure 1- Universités et partenaires impliqués dans le projet CCIMC

<sup>1</sup> Un ligand est un atome, un ion ou une molécule portant des groupes fonctionnels lui permettant de se lier à un ou plusieurs atomes ou ions centraux

<sup>2</sup> Opération visant à séparer le catalyseur du mélange réactionnel en vue de son recyclage

<sup>3</sup> Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>4</sup> Laboratoire de chimie de coordination – Université Paul Sabatier

<sup>5</sup> Danmarks Tekniske Universitet

## Références :

[1] <https://www.ccimc.eu/>

[2] W. Huadsai, L. Vendier, H. Gorls, L. Magna, S. Bontemps, M. Westerhausen, Eur. J. Inorg. Chem. 2024,

>> DOI : <https://doi.org/10.1002/ejic.202400128>

[3] Projet "MNP@CCM" : Catalyse biphasique aqueuse avec des nanoparticules métalliques immobilisées dans des nanoréacteurs à base de micelles réticulées. AAPG 2024 - Référence ANR-24-CE07-6647-01

[4] Thèse intitulée « Conversion des alcools en esters par catalyse homogène en cascade dans des liquides ioniques »

**Contacts scientifiques : Lionel Magna**

**>> NUMÉRO 60 DE SCIENCE@IFPEN**

CCIMC : un réseau européen pour les doctorants en chimie de coordination

Numéro 60 de Science@ifpen : spécial recherche partenariale  
09 mars 2026

Lien vers la page web :