UVSQ université PARIS-SACLAY
Mantes Recherche
CAMPUS DE MANTES EN YVELINES

I·D·E·E·S

Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité

*Une revue interdisciplinaire de **Mantes Recherche***

DOSSIER SPECIAL

Éthique et soutenabilité des industries à l'échelle des territoires

Dossier coordonné par :
Guillaume MARTIN, Maître de conférences en sciences de gestion

Varia

- Micro-structural and micro-hardness properties of alumina-fluoroapatite composite coatings on 316 L – stainless steel : Proethesis application
Halima GHORBEL et al
- Neuro-surveillance et subordination : vers un Habeas Mentem social
Benoît PETIT
- Énergies marines renouvelables (EMR) : optimisation hydrodynamique des hydroliennes et influence des fonds marins
Ferhat HADRI et al

Regards Croisés

- Éric HAAN (Directeur du site industriel Stellantis à Poissy – L'usine Stellantis, Poissy, un exemple d'agilité et de résilience au service de la compétitivité durable
- Laurent LAPIERRE (Fondateur de Aurizeo) - Incubation d'un projet industriel sur le territoire : lien avec la recherche appliquée et la formation

N°1 | NOVEMBRE 2026

Équipe éditoriale

Directeur de la publication : Pr Benoit PETIT

Rédacteur en chef : Guillaume MARTIN

Rédacteur adjoint (sciences de l'ingénieur) : Sébastien CHARLES

Rédacteur adjoint (sciences humaines et sociales) : Jean-Claude LOPEZ

Rédacteur adjoint (sciences du spatial) : Halima GHORBEL

Rédacteur adjoint (industries, territoires & pédagogie) : Yamina SEHIL

Secrétaire de la revue : Virginie HARDELAY

Comité scientifique de lecture et d'évaluation

Pr. Benoit PETIT
(UVSQ – LIMEEP-PS)

Pr. Marie-Emma BOURSIER
(UVSQ – Dante)

Pr. Abderrezak CHERIFI
(UVSQ)

Pr. Pierre Richard DAHOO
(UVSQ – LATMOS)

Pr. Frédéric LERICHE
(UVSQ – LIMEEP-PS)

Pr. Birahim GUEYE
(UFR SEG/UGB Sénégal - SERGe)

Pr. Rachid EL BETTIOUI
(Ibn Zohr Maroc)

Guillaume MARTIN
(UVSQ – LIMEEP-PS)

Jean-Claude LOPEZ
(UVSQ – LIMEEP-PS)

Marcella COSTIN
(UVSQ -LAREQUOI))

Sébastien CHARLES
(UVSQ – LISV)

Halima GHORBEL
(UVSQ – LATMOS)

Ferhat HADRI
(UVSQ – LISV)

Catherine CAZELLES
(UVSQ)

Nicolas DI SCALA
(UVSQ – GEMaC)

Yamina SEHIL
(PRAG IUT de Mantes-en-Yvelines)

Amine BEY
(UVSQ)

ISSN (imprimé) : en cours d'acquisition

ISSN (en ligne) : en cours d'acquisition

Dépôt légal : Novembre 2026

POSITIONNEMENT DE LA REVUE

IDEES : faire dialoguer les sciences et les acteurs de l'industrie au service d'une industrie éthique et soutenable

La naissance de *Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)* répond à une ambition claire : offrir un espace scientifique de référence consacré aux interactions entre industrie, éthique et soutenabilité.

L'enjeu vise la fondation d'une nouvelle culture industrielle, capable de stimuler et de porter un mode de développement pouvant « *répondre aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* » (rapport Brundtland, 1987). En d'autres termes, c'est l'ensemble du champ décisionnel des organisations industrielles qui est appelé à se métamorphoser : comment et quoi produire en prenant en compte les limites de la croissance établies par le rapport Meadows dès 1972 et de nos jours par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ? avec qui, et selon quels principes et quels dispositifs d'organisation du travail ? selon quels objectifs économiques et sociétaux, et plus largement en fonction de quelles nouvelles équations de conciliation entre les intérêts privés et l'intérêt général ?

Un débat persiste quant à savoir si nous vivons encore à l'ère de l'Holocène ou si nous sommes déjà entrés dans une nouvelle ère géologique, celle de l'Anthropocène. Il existe néanmoins un consensus sur le fait que l'éthique industrielle soulève le défi d'inventer un nouveau rapport comportemental à l'activité productive permanente de l'Humanité, afin de garantir les conditions de sa survie, de sa cohésion et de son progrès — des enjeux aujourd'hui gravement compromis par les conséquences écologiques, sanitaires et sociales des anciens modèles industriels.

Ce rapport inédit concerne fondamentalement les valeurs morales qui sous-tendent toutes les décisions prises, à tous les niveaux d'intervention, par l'organisation industrielle et ses acteurs. Le sujet est celui de ce que l'Industrie *doit-être* – en tant que force productive, qu'employeur, qu'inventeur et concepteur des technologies… – dans la double perspective déontique et axiologique : qu'est-ce qui s'avère nécessaire, et qu'est-ce qui s'avère estimable ?

En conséquence, il convient d'assigner un objectif sociétal universel à l'éthique industrielle – un ou plusieurs « buts monumentaux » à accomplir à partir desquels la démarche peut prendre tout son sens et toute sa profondeur.

Prescrire ce que l'Industrie *doit-être*, suppose en effet d'identifier au préalable ce à quoi elle doit se conformer. Or, sur cet enjeu élémentaire, l'Industrie n'est pas libre de ses choix : son action est subordonnée à plusieurs réalités : naturelles tout d'abord, puisque toute production dépend du capital des ressources disponibles ; scientifiques ensuite, dès lors que la production se déploie au sein d'un cadre stricte de lois physiques ; économiques car le modèle choisi détermine en profondeur notre manière de produire ; politiques enfin, puisque ce sont les États qui, aux niveaux national et international, déterminent les objectifs (et les contraintes

qui les accompagnent) à partir desquels l'Humanité imagine les modèles de société vers lesquels elle tend, aussi bien du point de vue économique, social, culturel que moral.

Cet objectif sociétal universel, constitué par des « buts monumentaux » exogènes à l'Industrie, est communément désigné sous le terme de « Soutenabilité ». Il suppose à la fois des exigences de qualité et de durabilité, de robustesse, qui (re)définissent les notions de performance, de progrès et de cohésion sociale. Il est à la fois un horizon et une restriction pour les trajectoires industrielles, en même temps qu'un ensemble particulièrement diversifié de défis techniques, technologiques, juridiques, socio-économiques, managériaux et philosophiques.

Une (ré)industrialisation ancrée dans les territoires, soutenue par l'épargne locale et attentive aux contraintes écologiques et sociales, est aujourd'hui possible. Par ailleurs, dans de nombreux travaux récents sur les modèles productifs, la dimension économique - la concurrence, la compétitivité - est trop souvent absente. Or, notre modèle économique détermine en profondeur notre manière de produire. C'est pourquoi l'industrie doit être pensée au service d'un projet de société, qui en fixe les finalités et les critères d'arbitrage. Une fois ce cadre clarifié, dessiner un outil productif cohérent devient une tâche moins incertaine - même si elle reste exigeante.

L'éthique et la soutenabilité des industries se présentent ainsi comme des objets consubstantiels de recherche qui font intervenir toutes les disciplines scientifiques. Il s'agit d'observer et d'étudier des systèmes de valeurs morales (leurs substances, leurs effets comportementaux, leurs évolutions et leurs interactions), constitués au sein du monde industriel, aux fins de comprendre leur contribution à la réalisation d'un ensemble de buts monumentaux exogènes et impératifs et, le cas échéant, de proposer des trajectoires rectifiées de mise en conformité.

Parmi les nombreux questionnements induits dans une logique interdisciplinaire :

- La nature, la force et l'articulation des normes qui structurent les systèmes éthiques industriels (*hard law/soft law*, sanctions, processus de conception des normes, légitimité normative…).
- Le rapport des normes à la technique, à l'expertise, au jugement moral.
- Les nouveaux modèles de production prenant en compte notamment la décarbonation industrielle, l'économie circulaire, la nouvelle économie du spatial.
- Les enjeux liés à la géopolitique terrestre, notamment en ce qui concerne les opportunités industrielles conditionnées par la masse critique de l'Europe, ainsi que ceux liés à l'espace extra-atmosphérique, avec l'essor d'une industrie spatiale soutenue par des technologies et des infrastructures de nouvelle génération.
- La réindustrialisation des territoires, la géographie industrielle et la mondialisation, la relocalisation des activités industrielles.
- La Responsabilité Sociétale des Entreprises Industrielles, la Responsabilité Sociale des Territoires, les dispositifs de « *compliance* », les devoirs de « *due-diligence* » et de vigilance, l'intégration des droits humains dans les politiques industrielles…
- Les enjeux liés à la souveraineté industrielle.
- Les dynamiques économiques entre mondialisation et démondialisation.

- La gouvernance des organisations industrielles, les politiques de management de la force de travail, la considération des parties prenantes dans les processus décisionnels, la communication éthique…

- Le rapport aux nouvelles technologies, notamment sous le prisme des risques éthiques liés à l'intelligence artificielle et son impact sur les industries…

POLITIQUE ÉDITORIALE ET MODALITÉS D'ÉVALUATION SCIENTIFIQUE

Publics et positionnement de la revue

La revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES) s'adresse prioritairement aux enseignants-chercheurs, doctorants, étudiants, ainsi qu'aux acteurs institutionnels et industriels intéressés par les enjeux d'éthique, de soutenabilité et de transformation des systèmes productifs.

Gouvernance scientifique et interdisciplinarité

Elle s'appuie sur un comité scientifique de lecture et d'évaluation garant de l'indépendance académique, de la rigueur méthodologique et de la qualité scientifique des contributions publiées. Le comité est composé d'enseignants-chercheurs et de chercheurs issus de disciplines complémentaires relevant des sciences de l'ingénieur, des sciences humaines et sociales, des sciences du spatial, assurant une approche résolument interdisciplinaire des problématiques traitées.

Processus d'évaluation et critères scientifiques

Les articles soumis à la revue font l'objet d'une évaluation scientifique en double lecture anonyme, conformément aux standards académiques reconnus. Les critères d'évaluation portent notamment sur l'originalité de la contribution, la solidité du cadre théorique et méthodologique, la qualité de l'analyse, la pertinence des résultats, ainsi que leur apport aux débats scientifiques relatifs aux enjeux d'éthique, de soutenabilité, d'industries et de territoires.

Ouverture aux approches empiriques et appliquées

La revue est également ouverte à des contributions à dominante empirique, appliquée ou méthodologique, notamment fondées sur des retours d'expérience, des études de cas, des démarches d'expérimentation ou d'innovation territoriale et industrielle, dès lors qu'elles s'inscrivent dans une problématique clairement explicitée et répondent aux critères de rigueur scientifique et d'analyse critique attendus.

Articulation avec les manifestations scientifiques de l'IUT de Mantes-en-Yvelines

Dans le respect de ces principes d'exigence et d'impartialité, la revue encourage la soumission de travaux présentés lors de manifestations scientifiques organisées par l'IUT, telles que l'EcoSpace et le Colloque Éthique et Soutenabilité des Industries. Ces contributions, issues des meilleures communications ayant déjà fait l'objet d'un premier processus de sélection académique, sont intégrées au flux éditorial dans des conditions identiques à celles des autres soumissions et évaluées selon les mêmes critères scientifiques.

Décisions éditoriales et modalités de révision

À l'issue du processus d'évaluation, les articles peuvent être acceptés, acceptés sous réserve de modifications ou refusés. Les auteurs disposent, le cas échéant, d'un délai de révision leur permettant de répondre de manière argumentée aux observations des évaluateurs.

Engagements éthiques et déontologiques de la revue

La revue *Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)* adhère aux principes d'intégrité scientifique, d'éthique de la recherche et de déontologie académique. Les auteurs s'engagent à soumettre des travaux originaux, non publiés et non simultanément soumis à d'autres revues. Toute situation de conflit d'intérêt potentiel doit être explicitement déclarée lors de la soumission. Le comité éditorial se réserve le droit de recourir à des outils de détection du plagiat et de prendre les mesures appropriées en cas de manquement aux règles éthiques.

SOMMAIRE

1 **Tribune libre du Directeur de la Publication** p. 10
Pr. Benoît PETIT

2 **Éditorial du Rédacteur en chef** p. 12
Guillaume MARTIN

3 **Grand entretien – Olivier LLUANSI** p. 16
Propos recueillis par Guillaume MARTIN

4 **Dossier spécial** p. 25
Dossier coordonné par Guillaume MARTIN
Éthique et soutenabilité des industries à l'échelle des territoires

Éthique, industrie et loi : vers un management ordonné au réel
Pr. Philippe JACQUINOT – Université Paris-Saclay, LITEM
Les finalités éthiques du droit de la compliance
Pr. Marie-Emma BOURSIER - Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Dante
Mesurer et institutionnaliser la légitimité : architecture délibérative et contractualisation au service d'une éthique industrielle opérationnelle
Jean-Claude LOPEZ - Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LIMEEP-PS
L'innovation au service de la transition énergétique et de la performance d'usage
Patrick SCHEMBRI - Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, CEARC / Arnault BARICHELLA – Université Paris-Saclay, Centre d'études européennes et de politique comparées de Science Po / Katia RADJA - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, CEARC / Salim SEBAÏ - Chercheur au Centre de recherche sur les carburants d'Aramco / Pr. Fadila MAROTEAUX - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Institut de technologie de Vélizy
Industries et réindustrialisation des territoires, une lecture géographique
Sylvie DAVIET - Aix-Marseille Université, UMR 7303, TELEMME / Pr. Frédéric LERICHE - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LIMEEP PS
Matériaux à Transition de SPIN (SCO) : de la Recherche Fondamentale à l'Application Industrielle
Nicolas DI SCALA – Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, GEMaC / Kamel BOUKHEDDADEN - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - GEMaC

5 **Étude de cas** p. 113
Campus Industrie Circulaire de la Mobilité (ICM)

Le campus « Industrie Circulaire de la Mobilité » (ICM) : catalyseur de la transition automobile et des compétences de demain
Pr. Sylvie DUGENEST - Groupe Renault, Campus d'Excellence de l'Industrie Circulaire de la Mobilité Groupe / Sébastien CHARLES Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LISV

6 **Varia** **p. 128**

Micro-structural and micro-hardness properties of alumina-fluoropatite composite coatings on 316L – Stainless: Prothesis application
Halima GHORBEL - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LATMOS / Radouane AKRACHE - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LISV / Jinan CHARAFEDDINE - De Vinci Higher Education, De Vinci Research Center / Awatef GUIDARA - Laboratoire des Matériaux Avances, ENIS, Sfax
Neuro-surveillance et subordination : vers un Habeas Mentem social
Benoît PETIT - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LIMEEP PS
Énergies marines renouvelables (EMR) : Optimisation hydrodynamique des hydroliennes et influence des fonds marins
Ferhat HADRI - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LISV / Alina SANTA-CRUZ - laboratoire des sciences appliquées de Cherbourg / Fatima KHALED - laboratoire des sciences appliquées de Cherbourg

7 **Regards croisés/Interviews des acteurs industriels des territoires** **p. 159**
4 entretiens
- Éric HAAN - « *L'usine Stellantis Poissy, un exemple d'agilité et de résilience au service de la compétitivité* durable »
Directeur du site industriel de Stellantis à Poissy, propos recueillis par Guillaume MARTIN - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LIMEEP PS
- Laurent LAPIERRE - « *Incubation d'un projet industriel sur le territoire : lien avec la recherche appliquée et la formation* »
Fondateur d'Aurizeo, propos recueillis par Yamina SEHIL (PRAG à l'IUT de Mantes-en-Yvelines)

8 **Jeunes chercheurs** **p. 169**
Thèses, projets, travaux de recherche
Quelles performances des exploitations agroécologiques en grandes cultures ?
Elise YGAUNIN - UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay / Maude QUINIO, UMR SADAPT, AgroParisTech, INRAE, Université Paris-Saclay / François COLÉNO, UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay / Aude BARBOTTIN - UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay
Les enjeux et modalités de la mise en place des bio déchets dans le Grand Reims
Enola LAMY - Université Reims Champagne Ardenne, CRIEG
Selection of the chemical adsorbents and operating conditions for the injection traps onboard the Dragonfly Mass Spectrometer Gas Chromatograph
Alex ABELLO / Caroline FREISSINET / Théo GOVEKAR / Cyril SZOPA - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Paris-Saclay / Arnaud BUCH / Joël CASALINHO - LGPM, CentraleSupélec, Paris-Saclay / Melissa TRAINER - NASA Goddard Space Flight Center

9 **Pédagogie innovante** **p. 190**
Retours d'expérience et innovations pédagogiques
Course en Cours : un dispositif pédagogique innovant réalisé par plus de 100 00 élèves, né à l'IUT de Mantes-en-Yvelines, qui fête ses 20 ans !
Cyril BROSSARD - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines / Radouane AKRACHE - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines / Thomas AUBERT - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

10 **Présentation d'un ouvrage** **p. 196**
France : une souveraineté sous influence ?

Christophe ASSENS - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, LIMEEP-PS

1 TRIBUNE LIBRE DU DIRECTEUR DE LA PUBLICATION



Pr. Benoît PETIT

Directeur de la publication

Au-delà du chiffre : miser sur les fondements humains du renouveau industriel

L'impératif de réindustrialisation sature le discours politique contemporain. Pour autant, ce renouveau structurel piétine. Il se heurte de front aux crises systémiques actuelles — chocs énergétiques, poussées inflationnistes, instabilités géopolitiques — qui paralysent les arbitrages financiers à long terme. La reconstruction de notre appareil productif demeure pourtant une condition non négociable de notre souveraineté face à des chaînes d'approvisionnement mondiales à bout de souffle. Façonnées par le dogme du flux tendu et du zéro-stock, ces logiques logistiques souffrent d'une hyper-fragmentation et d'une dépendance critique à des hubs de sous-traitance ultra-spécialisés. Au moindre choc, le système rompt. Malheureusement, la réponse à ce défi reste prisonnière des vieux réflexes d'un libéralisme doctrinal hérité du siècle dernier, qui s'obstine à subordonner l'usine à la seule optimisation comptable. Ce réductionnisme engendre le mirage technocratique de l'« Industrie 4.0 » et son fantasme ultime : la *lights-out factory*, cette usine aveugle et robotisée fonctionnant sans présence humaine. Selon cette grille de lecture, l'injection massive d'intelligence artificielle suffirait à faire renaître nos structures de leurs cendres. C'est une erreur profonde. Cette vision technocentrée occulte une réalité sociologique et juridique fondamentale : il n'y a pas de réindustrialisation pérenne sans un pacte social réinterrogé.

L'élévation du niveau technologique ne saurait servir de caution à une régression des conditions de travail. Les contestations salariales actuelles ne relèvent pas d'une technophobie primaire ou d'un refus corporatiste du progrès. La crainte légitime des travailleurs ne cible pas tant l'outil que son instrumentalisation managériale à des fins de compression des coûts. Ce choix politique produit aujourd'hui un épuisement généralisé du corps social qui bouscule les clivages socioprofessionnels traditionnels. Le mal-être au travail n'est plus cantonné aux tâches d'exécution ; il frappe de manière indifférenciée les cadres et les fonctions stratégiques. L'explosion des cas de *burn-out*, les démissions en chaîne et les reconversions radicales en sont les symptômes les plus visibles. Le contentieux porté devant les conseils de prud'hommes reflète fidèlement cette crise de la charge psychosociale : les dossiers liés au harcèlement managérial, à la surcharge cognitive ou au manquement à l'obligation légale de sécurité de résultat s'y accumulent. L'introduction non régulée de l'intelligence artificielle agit trop souvent comme un vecteur d'intensification des cadences et de surveillance algorithmique invasive. En externalisant le coût humain de cette course à la rentabilité sur l'Assurance maladie et la branche Accidents du Travail et Maladies Professionnelles (AT/MP), le modèle actuel opère un transfert de charges injustifiable du secteur privé vers la collectivité.

Rompre avec cette trajectoire exige d'abord de faire le pari d'un dialogue social renforcé. Admettre, par pragmatisme, que le centre de gravité du droit du travail se déplace désormais de la loi nationale vers l'accord d'entreprise est une approche défendable. Rapprocher la

norme du terrain a un sens opérationnel. Néanmoins, cette décentralisation normative n'est admissible qu'à la condition stricte que les instances de représentation du personnel disposent de prérogatives élargies. La transition technologique ne peut pas se décider en vase clos dans l'intimité des comités de direction. Le modèle historique de l'« information-consultation », qui réduit les représentants à un rôle de spectateurs impuissants, est obsolète. Pour que les organisations syndicales et les comités sociaux et économiques (CSE) pèsent sur les choix stratégiques liés notamment à l'intelligence artificielle, l'évolution vers des mécanismes de codétermination est inévitable. C'est par ce rééquilibrage des forces, où la négociation collective devient l'outil de coconstruction des modes de production, que nous légitimerons l'innovation. La responsabilité sociale des organisations (RSO) doit cesser d'être un affichage cosmétique pour s'inscrire dans des structures de gouvernance décisionnelles.

Cette refonte démocratique de l'entreprise trouve son corollaire indispensable dans une seconde orientation, qui touche au cœur même de notre mission académique : l'investissement massif et stratégique dans le capital humain. Dans cette perspective, les gains de productivité et les profits substantiels générés par l'élévation du niveau technologique ne sauraient être confisqués par la seule logique financière ; leur admissibilité éthique et juridique est strictement conditionnée à leur réinvestissement direct au bénéfice des travailleurs. Cela exige d'une part le financement d'une véritable formation tout au long de la vie, garantissant la promotion des carrières par l'acquisition permanente de nouvelles compétences face à l'obsolescence accélérée des savoirs. Cela impose d'autre part une redistribution salariale pérenne et structurelle. Cette juste répartition des dividendes de l'innovation ne peut plus se contenter d'expédients cosmétiques ou conjoncturels, tels que l'octroi de simples primes exceptionnelles ou un accès facilité à des heures supplémentaires — dispositifs volatils qui ne font qu'entériner l'intensification du travail sans sécuriser le niveau de vie. C'est à ce prix, face aux mutations induites par l'intelligence artificielle, que nous pourrons opérer un changement de paradigme sémantique et opérationnel : il est temps de parler moins d'« emploi » et davantage de « carrière ». La gestion de l'emploi, souvent réduite à une approche comptable et court-termiste de flux et de suppressions de poste, doit s'effacer au profit d'une véritable gestion des carrières, adossée à une protection sociale renforcée, garantissant la mutabilité des profils et la sécurisation des trajectoires professionnelles tout au long de la vie.

L'Université, et singulièrement nos Instituts Universitaires de Technologie (IUT), se situent au carrefour de cette ambition. Acteurs historiques de la formation professionnelle supérieure, ancrés au plus près des bassins d'emploi territoriaux, nos instituts détiennent les clés de cette élévation des compétences. Cependant, cette mission ne prendra son sens que si elle rencontre, au sein des entreprises, des décideurs capables de préférer la valorisation des parcours à la rentabilité immédiate. C'est par cette alliance exigeante entre une gouvernance économique responsable et l'institution universitaire que nous formerons des cadres et des techniciens capables de maîtriser l'outil technologique sans en subir l'aliénation, faisant enfin de la réindustrialisation le synonyme d'un authentique progrès social.

2 ÉDITORIAL DU RÉDACTEUR EN CHEF



Guillaume MARTIN

Rédacteur en chef

IDEES, bien plus qu'une revue : une ambition collective !

Chères lectrices, chers lecteurs,

Le premier numéro de la revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES) marque une étape importante pour le collectif Mantes Recherche. Née en 2023, à l'initiative de la direction de l'IUT, Mantes Recherche se positionne comme une plateforme de collaboration scientifique, à l'interface d'un territoire riche en industries, conjuguant rayonnement territorial et capacités interdisciplinaires au service de l'innovation et de la réindustrialisation durable.

Des enseignants-chercheurs issus de 7 laboratoires de recherche de l'UVSQ : LISV, GEMAC, LAREQUOI, LIMEEP-PS, DANTE, VIP, LATMOS constituent une communauté interdisciplinaire d'excellence que nous avons souhaité mettre en mouvement.

Faire de la recherche à IUT est un défi que nous avons souhaité relever ensemble !

Ce collectif a reçu l'assentiment de la commission de recherche de l'UVSQ le 16 octobre 2025. Ses missions sont de plusieurs natures. La première est de se positionner comme une plateforme de collaboration scientifique sans être à proprement parler une équipe de recherche indépendante. La seconde est de faire l'interface avec un territoire riche en industries en rassemblant enseignants-chercheurs, doctorants et partenaires institutionnels et industriels dans une dynamique collaborative. La troisième est de contribuer au rayonnement territorial de nos laboratoires en renforçant leur visibilité scientifique et territoriale dans la stratégie de l'UVSQ et de l'Université Paris Saclay. La quatrième est de développer des projets interdisciplinaires en proposant et en développant des projets au croisement de l'ingénierie et des sciences humaines et sociales.

Un axe fédérateur : Éthique et soutenabilité des industries à l'échelle des territoires

La **réindustrialisation** est un projet de société majeur qui va bien au-delà de la seule dimension économique. Elle interroge notre modèle de développement et ses impacts sur l'ensemble de notre société.

Nous faisons ici la distinction entre l'éthique et la soutenabilité.

L'éthique implique des choix de valeurs, des orientations politiques et des arbitrages sur la manière dont nous voulons construire notre avenir collectif. Cela nous conduit à nous poser des questions fondamentales : quelle place voulons-nous donner au travail et aux travailleurs ? Comment voulons-nous organiser la production pour qu'elle soit plus juste et moins inégalitaire ? Quelles normes, quelles gouvernances, quels objectifs humains nous faut-il établir ?

La **soutenabilité**, quant à elle, repose sur une approche différente. Elle nous impose de nous conformer à des standards technologiques et des savoirs scientifiques qui garantissent la préservation de notre environnement et de notre capacité à nous développer durablement. C'est l'ensemble de ces défis, à la fois sociétaux, écologiques et technologiques, que nous abordons, en posant les bases d'une réindustrialisation qui soit à la fois performante et pleinement responsable.

Pour soutenir ce questionnement, un premier colloque été organisé les 25 et 26 septembre 2025.

Le colloque *Ethique et Soutenabilité des Industries à l'échelle des territoires, labellisé par la MSH Paris Saclay,* visait à questionner le rôle de l'industrie autour d'un objectif sociétal universel : produire de manière soutenable, en conciliant performances économiques, responsabilité sociale et respect des limites planétaires. Face aux défis environnementaux, sociaux et géopolitiques, il s'agissait d'interroger les valeurs, normes et finalités qui guident aujourd'hui les choix industriels.

Conférences et tables rondes ont abordé les conditions d'un nouveau contrat entre industries, société et territoires, à travers cinq thématiques majeures : 1) éthique, valeurs et responsabilité sociétale dans les dynamiques industrielles, 2) innover pour transformer les usages, l'énergie et le travail, 3) université et industrie : un carrefour stratégique pour la formation et l'innovation, 4) enjeux géopolitiques et industries, 5) soutenabilité dans l'industrie agroalimentaire.

Nous avons également organisé deux universités du spatial, une d'été (2025) et une de printemps (2026). Porté par Halima GHORBEL (LATMOS), ce colloque est un événement scientifique dédié aux enjeux du domaine spatial regroupant étudiants, élèves, enseignants, chercheurs et acteurs du secteur aérospatial, tous animés par une passion commune : l'espace et ses enjeux (métiers, d'ingénierie, d'exploration, technologiques, biotechnologiques, économiques, juridiques et géopolitiques). Nous avons souhaité réserver une place pour des communications de recherche et des posters en sciences du spatial et en sciences humaines et sociales pour donner à cet événement une dimension scientifique.

Nourri en partie par les réflexions issues de ces événements et adossé à un processus d'évaluation rigoureux, ce premier numéro rassemble :

- **Une tribune libre** du directeur de la publication Pr. Benoît PETIT (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LIMEEP PS), « *Au-delà du chiffre : miser sur les fondements humains du renouveau industriel* ».
- **Un grand entretien** avec Olivier LLUANSI, Professeur au Cnam, ex-dirigeant de Saint-Gobain, ex-conseiller industrie à l'Élysée, fondateur de Territoires d'industrie et porteur d'un manifeste citoyen « *dessine un chemin vers une France qui innove, produit et en est fière* », propos recueillis par Guillaume MARTIN (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LIMEEP PS)
- **Un premier cahier spécial** issu du colloque « *éthique et soutenabilité des industries à l'échelle des territoires* », réunissant six contributions et ouvrant un dossier en deux volets consacré à ces enjeux :
  - « Éthique, industrie et loi : vers un management ordonné au réel - Synthèse philosophique pour une règle d'action managériale durable dans une perspective aristotélicienne » - Pr. Philippe JACQUINOT (Université Évry Paris-Saclay, LITEM)
  - « Les finalités éthiques du droit de la compliance » - Pr. Marie-Emma BOURSIER (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Dante)
  - « Mesurer et institutionnaliser la légitimité : architecture délibérative et contractualisation au service d'une éthique industrielle opérationnelle » - Jean-Claude LOPEZ (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LIMEEP PS)
  - « L'innovation au service de la transition énergétique et de la performance d'usage » - Patrick SCHEMBRI (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, CEARC), Arnault BARICHELLA (Université Paris-Saclay, Centre d'études européennes et de politique comparée de Sciences Po), Katia RADJA (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, CEARC), Salim SEBAÏ (Chercheur au Centre de recherche sur les carburants d'Aramco), Fadila MAROTEAUX (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Institut de technologie de Vélizy)
  - « Industries et réindustrialisation des territoires, une lecture géographique » - Pr. Sylvie DAVIET (Aix-Marseille Université, UMR 7303 TELEMME), Pr. Frédéric LERICHE (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LIMEEP PS)
  - « Matériaux à Transition de Spin (SCO) : de la Recherche Fondamentale à l'Application Industrielle » - Nicolas DI SCALA (Université de Versailles Saint-Quentin-en - Yvelines - GEMaC), Kamel BOUKHEDDADEN (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - GEMaC)
- **Une étude de cas** emblématique du territoire des Yvelines « Le campus Industrie Circulaire de la Mobilité (ICM) : catalyseur de la transition automobile et des compétences de demain » - Sylvie DUGENEST (Groupe Renault – Campus d'Excellence de l'Industrie Circulaire de la Mobilité), Sébastien CHARLES (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LISV)
- **Des contributions variées**, croisant les approches disciplinaires et les perspectives, pour éclairer les enjeux contemporains de l'éthique et de la soutenabilité industrielles :
  - « Micro-structural and micro-hardness properties of alumina-fluoroapatite composite coatings on 316L - stainless steel: Prothesis application » - Halima GHORBEL (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LATMOS), Radouane AKRACHE (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LISV), Jinan CHARAFEDDINE (De Vinci Higher

Education, De Vinci Research Center), Awatef GUIDARA (Laboratoire des Matériaux Avances, ENIS, Sfax)

- « Neuro-surveillance et subordination : vers un Habeas Mentem social » - Pr. Benoît PETIT (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LIMEEP PS)
- « Énergies marines renouvelables (EMR) : Optimisation hydrodynamique des hydroliennes et influence des fonds marins » - Ferhat HADRI (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LISV), Alina SANTA-CRUZ (laboratoire des sciences appliquées de Cherbourg), Fatima KHALED (laboratoire des sciences appliquées de Cherbourg)

- **Des regards croisés des acteurs industriels du territoire :**
  - Éric HAAN (Directeur du site industriel de Stellantis à Poissy) : « L'usine Stellantis Poissy, un exemple d'agilité et de résilience au service de la compétitivité durable ». Propos recueillis par Guillaume MARTIN (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - LIMEEP PS)
  - Laurent LAPIERRE (fondateur d'Aurizeo) : « Incubation d'un projet industriel sur le territoire : lien avec la recherche appliquée et la formation ». Propos recueillis par Yamina SEHIL (PRAG à l'IUT de Mantes-en-Yvelines).
- **Une rubrique dédiée aux jeunes chercheurs**, qui valorise leurs travaux et contribue à faire émerger de nouvelles perspectives sur les enjeux d'éthique et de soutenabilité :
  - « Quelles performances des exploitations agroécologiques en grandes cultures ? » - Elise YGAUNIN (UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay), Maude QUINIO (UMR SADAPT, AgroParisTech, INRAE, Université Paris-Saclay), François COLÉNO (UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay), Aude BARBOTTIN (UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay)
  - « Les enjeux et modalités de la mise en place des bio déchets dans le Grand Reims » - Enola LAMY (Université Reims Champagne Ardennes, Laboratoire CRIEG)
  - « Selection of the chemical adsorbents and operating conditions for the injection traps onboard the Dragonfly Mass Spectrometer Gas Chromatograph» - Alex ABELLO, Caroline FREISSINET, Théo GOVEKAR, Cyril SZOPA (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines – Paris-Saclay), Arnaud BUCH, Joel CASALINHO (LGPM, CentraleSupélec – Paris-Saclay), Melissa TRAINER (NASA Goddard Space Flight Center)
- **Une rubrique consacrée à la pédagogie innovante**, qui met en lumière pour ce premier numéro « Course en Cours : un dispositif pédagogique innovant réalisé par plus de 100 000 élèves, né à l'IUT de Mantes-en-Yvelines, qui fête ses 20 ans ! » - Cyril BROSSARD (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines), Radouane AKRACHE (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines) et Thomas AUBERT (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines).
- La présentation d'un ouvrage : « France : une souveraineté sous influence ? » - Pr. Christophe ASSENS, (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines – LIMEEP-PS)

La revue est un totem pour notre collectif : elle incarne ce qui nous rassemble et donne corps à notre ambition commune.

Bonne lecture !

3 GRAND ENTRETIEN

Olivier LLUANSI

Professeur au Cnam
Ex-dirigeant de Saint-Gobain, ex-conseiller industrie à l'Élysée
Fondateur de Territoires d'industrie et porteur d'un manifeste citoyen « dessine un chemin vers une France qui innove, produit et en est fière »



Propos recueillis par :
Guillaume MARTIN
Maître de conférences
UVSQ
LIMEEP-PS

Reconstruire une souveraineté industrielle : quels choix de société ?

G.M. : Vous portez en particulier un Manifeste citoyen pour une renaissance industrielle, thématique que nous avons reprise pour la journée du 27 novembre organisée par le Laboratoire Interdisciplinaire sur les Mutations des Espaces Économiques et Politiques – Paris-Saclay (LIMEEP PS) à l'Observatoire Versailles Saint Quentin (OVSQ). Ce manifeste entend dessiner le chemin vers une France qui innove, produit et en est fière. Vous défendez donc une réorientation de la commande publique vers le « *fabriqué en France* », ainsi qu'une plus grande stabilité du cadre réglementaire et administratif. Mais la souveraineté industrielle ne signifie pas que nous devons tout produire sur notre territoire. D'où ma première question : ***Comment déterminer ce que nous devons absolument continuer à produire en France, ce que nous devons développer et ce que nous pouvons accepter d'importer ?***

Ma deuxième question est assez liée. Dans le même temps, vous affirmiez récemment « *qu'une réindustrialisation qui ne respecterait pas nos objectifs environnementaux serait vouée à l'échec, car elle perdrait le soutien d'une partie de la population* » et vous vous dites convaincu dans le même temps qu'il est possible de réindustrialiser tout en respectant le principe de Zéro Artificialisation Nette (ZAN). Mais, vous le savez, réindustrialiser signifie aussi mobiliser du foncier, de l'énergie, des matières premières et des infrastructures. D'où cette deuxième question : ***jusqu'où peut-on réindustrialiser sans dépasser les limites environnementales, tout en prenant en compte l'hostilité « citoyenne » à laquelle sont souvent confrontés les projets industriels ?***

O.L. : Premier point, j'ai envie de répondre à une autre question d'abord, qui est : pourquoi réindustrialiser ? Parce que, depuis 2009 et les États-généraux de l'industrie, on est sorti intellectuellement et conceptuellement du modèle de tertiarisation de notre économie et les résultats que nous avons 15 ans après m'ont fait dire que nous étions dans une situation d'échec de notre politique de réindustrialisation si on prend des indicateurs, par exemple la part manufacturée dans le PIB est restée autour de 10 %. Pour commenter sur des petites évolutions, y compris la nomenclature statistique mais c'est l'ordre de grandeur, elle n'a pas

augmenté alors que la moyenne européenne est autour de 15 % et des pays comme l'Allemagne, la Suisse ou l'Italie sont autour de 20 %. C'est un premier constat.

Le deuxième est que, même pendant la période faste qui nous a fait croire que l'on était en phase de réindustrialisation (2017-2023), on a créé 15 000 emplois manufacturiers par an, il aurait fallu en créer huit fois plus pour être sur la trajectoire qui était souhaitée par le pouvoir politique, c'est-à-dire celle qui nous amènerait autour de 15 % d'industrie dans le PIB dans dix ans, autrement dit la moyenne européenne. Donc on voit l'écart, on était huit fois plus lent que ce que l'on aurait dû être et, aujourd'hui, on détruit de l'ordre de 20 000 emplois manufacturiers par an, c'est-à-dire que la phase de désindustrialisation, de repli de notre industrie aujourd'hui depuis mi-2024 est plus rapide que notre phase d'industrialisation entre 2017 et 2023.

On pourrait donc se dire finalement que la bataille est perdue. On a fait le collectif pour se poser cette question, non pas de manière unique mais vraiment comme une question politique parce que de l'industrie, c'est de la souveraineté, vous l'avez souligné, c'est de la cohésion sociale et territoriale. Vous ne l'avez pas souligné mais c'est très important, on ne mettra pas de l'économie tertiaire à haute valeur ajoutée dans des sous-préfectures parce que ce n'est pas le rôle de cette ville-là. En revanche, on peut y mettre de belles usines très digitalisées, numérisées avec de beaux profils de techniciens et d'ingénieurs qui rapportent de la valeur ajoutée aux territoires et qui leur permettent de se développer avec une forme de ruissellement sur les services publics qui fonctionnent et sont documentés, vers des écoles, des infrastructures publiques, culturelles, sportives, etc.

Puis, le troisième élément, et on y reviendra avec votre dernière question, un outil productif servira nécessairement à notre transition écologique. Oui, nous devrons adapter nos modes de vie, nos modes de consommation mais nous devrons adapter aussi tous les objets du quotidien qui nous entourent : une voiture électrique est un produit manufacturé ; une pompe à chaleur est un produit manufacturé ; un panneau solaire l'est aussi.

Donc on aura besoin de génie industriel pour trouver les solutions d'un monde en limites planétaires. C'est absolument indispensable.

La question qui peut se poser : est-ce que c'est possible ? Et, quelque part, c'est la question qui nous est posée par le retour des Cassandre de la réindustrialisation en disant « *on vous l'avait bien dit, il ne faut faire que de l'innovation de rupture et du service* ».

Nous nous sommes rassemblés en une vingtaine de personnes d'horizons très divers, qui ont formé un collectif et on a regardé le sujet de l'industrie. On voit bien que le sujet de l'industrie est un sujet politique avant d'être un sujet économique parce que la souveraineté, la cohésion sociale et territoriale, la transition écologique sont des sujets politiques. Donc, on a regardé les différentes mesures qui étaient sur la table pour faire notre réindustrialisation avec un angle politique, et la politique conduit à faire la distinction entre ce qui fait consensus et ce qui fait débat.

Nous avons mis en évidence, à travers ce collectif, qu'il y a neuf mesures majeures, dont la commande publique, la mobilisation de l'épargne, un rapport équilibré au foncier (cela fait partie de votre question), mesures qui font consensus entre nous. Quand je dis « entre nous », il y avait des chefs d'entreprise engagés dans des mouvements patronaux, des syndicalistes issus de syndicats que l'on appelle « de lutte » ou contestataires, des économistes de l'OCDE

avec une vue internationale, des élus locaux, des étudiants ; donc une grande diversité de points de vue.

Ce que l'on essaie de démontrer aujourd'hui, c'est que ce consensus que l'on a réussi à démontrer autour d'une vingtaine de personnes, c'est une espèce de nucléus, est beaucoup plus profond dans la société française. Donc ce manifeste est en chemin pour recueillir des soutiens. À date, on a aujourd'hui les soutiens de Force Ouvrière et des entrepreneurs, donc l'ex-CPME. J'ai des contacts avec l'IUMM, on a déjà aussi la Fédération des Industries Mécaniques qui fait déjà un tiers de l'IUMM ; j'ai des contacts avec la CGT comme avec le MEDEF qui sont en cours.

G.M. : L'éventail est large.

O.L. : En fait, il y a une espèce de consensus de la société civile pour avoir le courage de mettre en œuvre ces mesures, que l'on va qualifier de consensuelles.

Ensuite, la partie n'est pas perdue. C'est une nécessité pour faire société. Ce n'est pas qu'un sujet économique. C'est un sujet, oui, de prospérité mais c'est un sujet de faire société autour des valeurs de souveraineté, de cohésion sociale et territoriale, et de transition.

Deuxième point, et là je reviens sur votre première question, qu'est-ce que l'on peut réindustrialiser ? Qu'est-ce qu'on peut ramener en production ? En fait, c'est une question assez profonde.

Premièrement, on ne pourra pas tout relocaliser. Il y a une étude du *SHIFT Project* assez intéressante et qui dit que, si on relocalisait tout, nous n'aurions pas de toute façon assez d'énergie pour le faire parce que nous importons une bonne partie de notre utilisation d'énergie à travers les biens manufacturés qui ont un contenu énergétique. Ils ont aussi un contenu carbone d'ailleurs. On n'a pas l'infrastructure énergétique pour le faire. Il y a beaucoup d'autres éléments qui peuvent faire la démonstration, on s'arrête là.

Donc il faudra faire des choix.

En France, pendant longtemps, on a fonctionné sur ce que l'on a appelé les filières stratégiques. On peut donc se dire « *on va réinvestir sur les filières stratégiques* ».

Difficultés, les filières stratégiques qui ont été définies à partir des années deux mille, deux mille dix n'ont pas de définition officielle. Des travaux de mémoires d'école des Mines démontrent que, même si on essaie de trouver une définition *a posteriori*, c'est-à-dire une cohérence entre ces différentes filières, on n'y arrive pas. Donc la définition de filière stratégique qui est structurante dans les politiques industrielles françaises, qui structure par exemple le Conseil national de l'industrie, la première structure du Conseil national de l'industrie étant les comités stratégiques de filière (un par filière stratégique), est une définition en fait peu robuste au regard des enjeux qui sont les nôtres, et notamment les enjeux de souveraineté.

Je conduis actuellement un projet pour le CNAM autour de la notion de « productions essentielles ». Quelles sont les productions qu'une nation, qu'une communauté (je vais utiliser ce terme pour élargir à l'échelle européenne) doivent maîtriser si elles veulent conserver la capacité d'être libres de décider de leur destin ?

Le concept est assez intuitif. Vous pouvez faire un micro-trottoir, on en fait de temps en temps, le collectif qui a fait le manifeste a mené un certain nombre de micro-trottoirs pour

capter aussi la voix non pas des experts mais de chacun de nos concitoyens. Si vous faisiez un micro-trottoir en expliquant ce concept, je pense que vous auriez des hochements de tête, des acquiescements. On voit bien conceptuellement, intuitivement ce que c'est.

Je vous mets devant une feuille blanche en disant « *quelles sont les vingt productions essentielles d'après vous* ? » C'est beaucoup plus difficile.

Donc on explore ça avec une recherche partenariale et pluridisciplinaire. On regarde en se disant que le signal prix, l'élasticité prix en termes économétriques ne doit pas être le même sur les productions essentielles que sur les productions non essentielles.

On regarde les questions de dépendance et d'essentialité vues des chaînes de valeur, en mobilisant toute la communauté des acheteurs et des directeurs de ce que l'on appelle la *supply chain*, la chaîne d'approvisionnement. Donc un aspect technique d'expertise.

On va également poser la question aux mêmes personnes que celles dont je parlais tout à l'heure, celles pour lesquelles on pourrait faire un micro-trottoir. On va organiser des mini-conventions citoyennes pour essayer de creuser le sujet avec des citoyens.

On va aussi regarder tous les exemples antérieurs de crises et de projets publics. Il y a une liste critique de médicaments. Il y a une tentative de faire une liste critique de produits chimiques au niveau européen. Il y a une liste de matières premières critiques au niveau européen. Il y a aussi eu une liste de productions de première nécessité pendant le Covid.

Tout cela constitue des expériences de politiques publiques autour de concepts assez similaires. L'objectif est de finir autour de juin 2027 dans le cadre de partenariat avec le Conseil d'État sur une définition juridique, qui puisse traduire ces travaux de recherche de terrain, de recherches pragmatiques, en termes juridiques.

Donc la réponse que je proposerais est incomplète, en tout cas encore inaboutie : je pense que, dans un monde de retour des empires, nous devons concentrer notre politique industrielle non pas sur exclusivement les filières stratégiques qui ont été définies quand on croyait encore à un monde de la mondialisation heureuse mais autour d'un concept de productions essentielles, qui n'est pas facile à concevoir. Il y a des débats très complexes autour des produits chimiques critiques actuellement mais c'est une réflexion collective qui est nécessaire si on veut progresser et savoir vers quoi on doit orienter nos politiques industrielles, qui sont encore une fois une nécessité. Mais l'objectif d'une politique industrielle ne permet pas de retourner à l'autarcie ; cela n'aurait aucun sens.

Voilà pour la réponse à votre première question qui était le « quoi ». Ensuite, il y a la question sur la limite environnementale.

Je vais explorer plusieurs degrés de réponse à votre question.

Le premier, vous avez évoqué le ZAN. On a quantifié, il y a eu plusieurs authentifications qui sont convergentes, de combien d'hectares on a besoin pour refaire une industrie en France dans les dix ans à venir. La réponse est autour de 25 000 hectares qui sont nécessaires pour construire de nouvelles usines. 25 000 hectares, c'est moins d'un terrain de foot par commune française. On voit bien, en prenant cette comparaison avec un élément du quotidien, que ce n'est pas un effort sur l'occupation foncière déraisonnable par rapport aux enjeux que j'ai rappelés et qui sont ceux de la souveraineté, de la cohésion territoriale et sans doute de notre transition écologique sur d'autres aspects.

D'autant plus qu'on peut considérer que, sur ces 25 000 hectares dont on a besoin, un tiers peut venir de friches à réhabiliter, un tiers de densification de tissus industriels existants. Il y a des terrains industriels privés par exemple qui ont encore beaucoup de surface disponible, on pourrait densifier l'occupation des sols. Puis, il y aura aussi besoin et cela, il faut l'accepter, c'est une question d'aménagement du territoire, à peu près un tiers d'artificialisation parce que, par exemple, si on trouve des friches dans le nord et dans l'est de la France, qui sont héritées de la période de désindustrialisation, nous n'avons plus de foncier disponible sur tout l'arc Atlantique. Donc, on ne peut pas affirmer que l'industrie est un outil de cohésion sociale et territoriale en disant que la moitié de la France n'a pas de terrain, donc au revoir, vous repasserez à la prochaine loi ZAN !

Donc on est dans cette équation : 8 000 hectares, le pari qu'on fait, et qui est fait par le Préfet Rollon MOUCHEL-BLAISOT, qui a été missionné en 2022, est que l'on doit pouvoir faire, avec des règles raisonnables de compensation, ces artificialisations de 8 000 hectares.

Si on fait le cumul de ces trois éléments (utilisation des friches, densification du foncier industriel, artificialisation avec compensation) on est dans le cadre des concepts, des principes du ZAN et donc on pourrait rendre de cette manière notre réindustrialisation compatible avec une loi qui, aujourd'hui, dans ses modalités, l'empêche, qui est la Loi ZAN parce que les modalités de compensation sont beaucoup trop exigeantes. Parce que la loi ZAN fait considérer des anciennes friches industrielles comme des espaces naturels, donc on revient à la case départ, ce qui est, en termes d'explications de bon sens aux citoyens, extrêmement difficile à accepter. Petite démonstration sur un des aspects : densité, sobriété foncière.

On pourrait faire notre réindustrialisation tout en respectant les principes de la loi ZAN, même si les modalités aujourd'hui sont largement sur-contraignantes, freinent et même bloquent dans certains territoires notre réindustrialisation.

Deuxième élément de réponse, pour aller un petit peu plus loin dans ce que vous indiquiez, il n'y aura pas de transition écologique sans, certes, c'est ce que je disais au départ, modification de nos modes de consommation mais aussi sans changement de tous les objets du quotidien. On est en train de basculer de la voiture thermique à la voiture électrique, cela fait partie des éléments où on mobilisera nécessairement le génie industriel.

Donc transition écologique, génie industriel et industrie ont destin lié. Tous les objets du quotidien, l'ordinateur devant lequel je vous parle, la chaise sur laquelle vous êtes assis et je suis assis sont des objets manufacturés qu'il va falloir concevoir différemment, produire différemment dans un monde que l'on veut sobre en ressources, cela veut dire économie circulaire et décarbonée, cela veut dire sources d'énergie qui sont nécessaires pour transformer la matière, de sources décarbonées.

Donc il y a un destin absolument lié. Nous ne ferons pas notre transition écologique, dans toutes ses dimensions, sans mobiliser massivement ou sans remobiliser du génie industriel.

Puis, je voudrais faire une esquisse, une ouverture un peu plus loin conceptuellement. Dans nos imaginaires, la souveraineté n'est pas très compatible avec l'environnement. Si je vous demande de me représenter, de m'incarner la souveraineté, vous allez peut-être me représenter un général très gradé ; si je vous demande de me représenter dans votre imaginaire l'environnement, vous allez peut-être me mettre un Zadiste ou un militant de Greenpeace.

Si je vous dis « *on va faire dialoguer ces deux personnes-là* », vous allez me répondre « *dans mon imaginaire, ce n'est pas évident* ».

Maintenant, ce sont nos imaginaires issus d'un monde qui n'est plus, parce que le monde a changé, parce qu'on a les limites planétaires, parce qu'on a le retour des empires, etc.

Dans ces cas-là, je préconise chaque fois de redescendre sur le terrain. Quand nos imaginaires butent sur un changement de paradigme, il faut revenir à la réalité des choses. Mettez-vous à la place d'un chef d'entreprise, d'une petite PME industrielle. Si on vous demande de faire de la décarbonation, vous allez vous électrifier. Vous faites en même temps de la souveraineté parce que vous abandonnez des énergies fossiles que vous importez pour une source énergétique produite localement.

Si on vous demande de sécuriser vos chaînes d'approvisionnement, vous allez chercher du circuit court ou de la circularité. Donc au nom d'une injonction de souveraineté ou de sécurité d'approvisionnement, vous allez faire une action qui est aussi bonne pour l'environnement et les enjeux environnementaux.

En fait, ces deux concepts, qui sont structurant pour la société que l'on est en train de construire et qui s'éloigne du modèle que l'on avait dans les années quatre-vingt-dix, qui a créé l'OMC et qui était de dire « la liberté de commerce crée de la prospérité, va permettre à la démocratie de s'étendre ». Le rêve de faire rentrer la Chine dans l'OMC était que la Chine progressivement devienne une grande démocratie. Et aussi que les pays créaient une espèce de tension sociale, qui fassent naître un pacte social un peu comme celui que l'on a en Europe, voire même que des élites émergent et soient sensibles aux enjeux environnementaux, et que l'on retrouve des politiques environnementales un peu comme celles que l'on a en Europe. C'était le rêve de la fin de l'histoire, comme cela a été dit. Cette histoire ne se passe pas.

Aujourd'hui, pragmatiquement, dans le monde dans lequel on est, avec les injonctions que l'on a, on est obligé de revoir nos imaginaires et, finalement, sur le terrain, le général qui pilote notre souveraineté et le militant Zadiste qui fait valoir les intérêts environnementaux disent à la micro-économie, à l'entreprise, au moins dans un premier temps de faire la même chose : se débarrasser d'énergies fossiles et importées pour faire des énergies décarbonées et maîtrisées nationalement, puis sécuriser des chaînes d'approvisionnement qui vont au bout du monde pour favoriser du circuit court et du circulaire, ce qui va, encore une fois, dans le même sens.

Voilà comment j'ai envie de répondre à votre deuxième question sur le lien entre industrie et transition écologique. Non seulement c'est possible, elles ont destin lié et, même cela va peut-être au-delà, elles sont conjuguées dans l'imaginaire qu'il nous faut construire de nos sociétés de demain.

G.M. : Dans cette continuité, c'est la question de la réindustrialisation des territoires et de la libération du potentiel. Vous avez rappelé dans vos réponses les neuf mesures du manifeste, dont j'ai bien connaissance. Vous insistez également sur le potentiel des PME, des ETI et des PMI ancrées localement, dans les projets de développement qui ne correspondent pas toujours aux critères privilégiés par les dispositifs actuels de soutien à l'industrie. ***Comment mieux prendre en compte leur contribution à la vitalité économique, sociale et environnementale des territoires ? Et, surtout, j'étais à l'événement BIG et je sais que vous y étiez aussi il y a quelques jours, faut-il repenser les critères d'intervention publique, notamment celle de la***

BPI, pour soutenir non seulement les ruptures technologiques, il faut de l'innovation technologique et de la rupture, mais aussi la modernisation de l'appareil productif, la transmission des savoir-faire et la pérennité de ce qui existe déjà sur le territoire national ?

O.L. : Si je regarde, avec la démarche du manifeste, celle de considérer que refaire industrie, c'est refaire société, donc c'est un acte politique, dans votre question, j'aurais envie de partager deux morceaux.

Il y a le morceau sur le potentiel des territoires. C'est un fait désormais, pour nous dans ce collectif, c'est un consensus. Donc cela fait partie des mesures consensuelles. Oui, c'est très bien d'aider l'innovation de rupture mais, encore une fois, dans un pays qui a besoin de refaire de l'industrie pour sa cohésion territoriale, pour sa souveraineté, pour sa transition écologique, deux tiers de notre potentiel de réindustrialisation vient non pas des nouvelles filières mais de la consolidation du développement de la modernisation des sites industriels existants. Là, oui, nous avons eu une politique avec France 2030 qui a été partagée entre innovation de rupture et décarbonation. Oui, la décarbonation a besoin d'être accompagnée par la puissance publique ; oui, l'innovation de rupture aussi, mais il y a un absent dans la pièce qui est la modernisation et le développement des sites industriels existants, notamment des PMI, avec un dispositif d'appel à projets extrêmement centralisé. La régionalisation de France 2030 ne concerne que 1 % des montants de France 2030, donc des modalités opératoires qui n'ont pas activé ce potentiel des territoires, soit deux tiers de notre potentiel de réindustrialisation. D'où une des raisons pour moi de l'échec que nous connaissons aujourd'hui par rapport à cette ambition.

Mais, là, il y a une forme de consensus aujourd'hui. Oui, il faut du courage pour faire un virage, pour faire un *aggiornamento,* peut-être même un *mea culpa* sur une espèce de pari tapis, où on a fait tapis sur l'innovation de rupture mais, encore une fois, si vous allez interroger la plupart des acteurs politiques et économiques, vous aurez un consensus sur ce nécessaire rééquilibrage - encore une fois, je ne dis pas qu'il faut arrêter de financer et accompagner l'innovation de rupture, ce n'est pas du tout mon propos - mais rééquilibrage de nos politiques industrielles. C'est le premier point.

Le deuxième point, on l'a classé dans les débats. Quand on a abordé le sujet des mesures pour accompagner notre renaissance industrielle de manière politique, il y a ce qui fait consensus et ce qui fait débat. On vient de parler dans votre question de ce qui fait consensus mais il y a aussi ce qui fait débat. Ce qui fait débat, par exemple, et qu'il nous faut porter au débat public : quel est le rôle des grands groupes dans notre réindustrialisation ?

Les grands groupes sont nos fleurons, notre fierté, donc ils participent de cet imaginaire d'une industrie glorieuse, qui a existé en France dans les années soixante, soixante-dix, qu'on incarne à travers des objets comme le TGV, les centrales nucléaires, Ariane, Airbus et d'autres. Et cela, c'est le produit de grands groupes.

Et puis ces grands groupes ont été conçus dans la politique pompidolienne, c'est délibéré, cela figure dans les écrits de Pompidou afin d'affronter la concurrence internationale qui commençait à poindre et qu'il avait anticipée. Et ils ont tellement bien réussi qu'aujourd'hui ils sont plus non français qu'ils sont français ; ils investissent plus hors de France qu'ils investissent en France ; ils ont plus de salariés hors de France qu'ils n'ont de salariés en France. En fait, leur ancrage territorial a disparu, d'une certaine façon s'est évaporé alors que, naturellement, la PMI et l'ETI sont véritablement ancrées dans un territoire. L'ETI a en

général des développements internationaux mais elle a un ancrage territorial fort et existant, et cet ancrage fait partie des valeurs de ces entreprises. Entre les deux, quelle est l'image que l'on va construire de notre outil productif demain ? On a une image extrêmement centrée sur les grands groupes, ce que l'on appelle les fleurons, et comment on arrive à les réconcilier avec la puissance… On a beaucoup aimé les ETI du *Mittlestand* allemand, on en a beaucoup parlé. Aujourd'hui, on commence à regarder pas mal des PMI extrêmement agiles de l'Italie, et exportatrices.

Quelle représentation aurons-nous de notre outil productif ? Aujourd'hui, il est encore hérité de de GAULLE, POMPIDOU, quel sera-t-il demain ? Là-dessus, ce sont des choix de société. Nous, le collectif, pensons qu'il faut rééquilibrer vers les PMI, les ETI, très bien mais c'est une véritable décision collective parce que la question du grand groupe par rapport au petit tissu économique ne se pose pas que dans l'industrie. On a des fleurons dans la finance. En fait, c'est un mode de fonctionnement de notre économie, donc cela interroge la manière dont on souhaite se projeter dans le monde par notre économie ou s'ancrer dans les territoires par notre économie. Cela, c'est un beau sujet de débat que l'on propose dans le manifeste en disant : nous avons notre opinion mais la question nous dépasse et on aimerait voir ce débat grands groupes/PMI, donc grands groupes internationaux qui font rayonner la France versus PMI qui sont ancrées dans les territoires. Là, il y a un sujet dont il faudrait que le débat public se saisisse.

G.M. : Il y a aussi la question de la mobilisation de l'épargne citoyenne. Qu'est-ce qu'on finance ? Quelle industrie on finance ? Sur quel territoire ? Et comment la valeur est partagée dans l'écosystème territorial ? Il y a aussi ces questions, quand on parle de PME/d'ETI dans les territoires, c'est la manière dont on les finance et la manière dont on associe les territoires dans ce financement. Et l'épargne citoyenne, qui a été mentionnée aussi dans un certain nombre de vos travaux, est une réponse aussi à cette manière de financer l'investissement dans les territoires.

O.L. : Tout à fait. Un des symboles de cet échec de notre réindustrialisation aujourd'hui est que l'on aurait besoin de 100 Md€ en fonds propres et dettes long terme pour refinancer la création d'un outil productif. C'est 2 à 3 % de notre épargne. Donc cela ne va pas déstabiliser les grands équilibres de notre épargne, à la fois dans le financement du déficit budgétaire ou dans la recherche d'optimisation de taux par la recherche de développements dans des pays plus en croissance que la France mais ces outils n'existent pas. Pourtant, la gestion de l'épargne publique est un domaine extrêmement réglementé, régulé. Donc la puissance publique, l'État, a les moyens d'ores et déjà de créer une injonction, une obligation, un fléchage d'une partie de notre épargne vers ce type d'objet.

Il y a un deuxième élément aussi intéressant dans votre question, qui a trait au partage de la valeur. On rentre un peu dans des choses plus spécialisées mais on a une fiscalité non compétitive en France, notamment à travers les impôts de production et également les cotisations patronales ou salariales qui pèsent sur le travail. On a une fiscalité sur l'outil productif, que ce soit l'investissement ou le travail, qui est décalée. On a les plus gros impôts de production d'Europe et, en contrepartie, on a la troisième TVA (impôt sur la consommation) la plus faible d'Europe. C'est un élément. C'est aussi un débat à avoir : est-ce que l'on fait ce rééquilibrage-là ? Vous comprenez bien que, si on pose la question à des gens qui sont pro industrie, ils vont dire « *oui, il faut tout de suite le faire* » mais ce débat est beaucoup plus profond, c'est un modèle de société, un modèle économique.

Et cela comprend un sous-débat qui est important à souligner : les impôts de production sont en fait des impôts locaux. Il y a donc une forme un peu de dilemme dans lequel je me trouve par exemple : d'un côté, j'aimerais la suppression des impôts de production parce qu'ils sont pénalisants en termes de compétitivité, en l'occurrence de compétitivité fiscale. D'un autre côté, j'ai l'absolue conviction qu'il faut que la valeur ajoutée créée dans un territoire soit répartie, peut-être pas par tiers mais entre le salarié, l'actionnaire, l'État régalien, qui donne un cadre mais aussi le territoire qui fait l'aménagement de toutes les infrastructures.

Typiquement, cela fait partie des choses sur lesquelles il faudra réfléchir, c'est ce que l'on propose à une refonte d'un pacte intergénérationnel dans lequel dire qu'il faut baisser les impôts de production est une évidence mais il faut trouver des éléments pour garder ce lien entre création de valeur ajoutée et fiscalité locale, qui était incarné jusqu'à présent par les impôts de production.

G.M. : Merci beaucoup pour vos réponses.

4 DOSSIER SPÉCIAL

Éthique, industrie et loi : vers un management ordonné au réel – synthèse philosophique pour une règle d'action managériale durable avec une perspective aristotélicienne



Pr. Philippe JACQUINOT
Professeur des Universités
Université Paris-Saclay
LITEM

Résumé

Dans le contexte de la crise écologique et sociale que notre époque traverse, cet article propose une réflexion philosophique sur les conditions d'un management véritablement durable. En nous appuyant sur la philosophie de ARISTOTE, nous articulons les concepts d'éthique, d'industrie et de loi pour dégager une règle d'action à l'usage des managers. L'argument central est que la durabilité ne saurait se réduire à une simple conformité aux normes : elle exige une transformation des pratiques et des mentalités fondée sur l'exercice de la prudence (*phronesis*), vertu à la fois intellectuelle et pratique que la philosophie aristotélicienne place au cœur de l'action bonne.

Mots-clés :

Management durable ; éthique aristotélicienne ; prudence (*phronesis*) ; loi naturelle ; vertu ; justice distributive.

Introduction

Le colloque « Management Durable » organisé les 25 et 26 septembre 2025 à l'IUT de Mantes a rassemblé industriels, chercheurs et enseignants. Un auditeur attentif pouvait distinguer, par-delà la diversité des approches, une conviction partagée : les disciplines les plus diverses peuvent concourir à un même horizon de soutenabilité. Chaque intervenant, qu'il soit manager, physicien ou juriste, est arrivé avec ses propositions, animé d'un souhait manifeste de transformer les pratiques et les règles.

Au-delà de la diversité des interventions, trois mots ont résonné tout au long de la première journée : éthique, industrie, loi. Cet article se propose d'éclairer philosophiquement ces trois notions pour en dégager une règle d'action à l'usage du manager.

Clarifications conceptuelles : éthique, industrie et loi

1.1. L'éthique comme disposition acquise et exercée

Le terme éthique vient du grec *ethos*, à savoir les habitudes et la manière d'être d'une personne. Ce sens est entendu ensuite chez ARISTOTE, de façon plus explicite, sous l'angle

du bien ou du mal, du vrai ou du faux, du juste ou de l'injuste. L'origine étymologique de morale, à savoir *mores*, suit le même mouvement : même sens premier, même glissement vers la dimension normative. Chez ARISTOTE, l'éthique est non pas une théorie abstraite, mais une pratique : « *Les vertus ne naissent en nous ni par nature, ni contre-nature ; mais il nous est naturel de les acquérir, et nous parvenons à leur plein accomplissement par l'habitude* » (EN, 1103a23-25, trad. J. VANIER). La vertu éthique est une disposition du caractère acquise par la répétition d'actes vertueux et ancrée dans le réel plutôt que dans des spéculations abstraites.

Appliquée au management, cette perspective implique que le dirigeant ne peut pas se contenter d'adhérer à des codes de conduite ou à des chartes éthiques. Il doit, jour après jour, cultiver en lui-même et chez ses collaborateurs les vertus nécessaires à l'exercice d'un management responsable : la justice, le courage, la tempérance, ainsi que la prudence, qui est la condition d'exercice des autres vertus.

1.2. L'industrie comme gouvernement d'un bien confié

Le terme management est souvent associé à l'étymologie italienne *maneggiare* qui évoque l'idée de manier, de conduire, voire de manipuler, renvoyant ainsi à une vision instrumentale du pilotage des organisations. Dans un manège, le cavalier agit sur sa monture tantôt par la cravache, tantôt par le sucre sans jamais solliciter ni son intelligence ni sa volonté propre. Cependant, une autre filiation étymologique, moins attestée mais plus suggestive, mérite d'être soulignée. Le latin *manere* (demeurer, séjourner) a donné, par son participe passé *mansus*, le terme manse, qui désignait dans le droit médiéval la tenure que la famille cultivait comme son propre bien, le droit successoral reconnaissant explicitement l'existence de « *biens propres à la famille* », transmis héréditairement de génération en génération. De ce même *manere* sont issus, au XIIIe siècle, *mesnage* (devenu ménage) et manoir, deux termes nés conjointement pour désigner la demeure et son gouvernement domestique.

Cette filiation suggère une conception bien différente du management : le dirigeant y apparaît avant tout comme un intendant chargé de préserver et de faire fructifier un bien qui lui est confié non pour lui-même mais pour les générations futures.

1.3. La loi entre universalité et positivité

ARISTOTE distinguait déjà loi universelle, inscrite dans la nature des choses, et loi positive, édictée par les hommes. Nous prolongeons ici cette distinction en retenant trois niveaux. Les lois cosmiques, d'abord : lois physiques (par exemple la gravité ou l'entropie) et lois morales inscrites dans la nature des choses. Ainsi, la trahison inflige une douleur profonde à celui qui la subit et expose celui qui la commet à une dégradation progressive de son propre caractère. ARISTOTE l'affirme : « *Les dispositions morales procèdent de la répétition d'activités qui leur sont similaires* » (EN, 1103b20, trad. J. VANIER). Chaque acte dispose ainsi l'homme à en poser du même type et c'est par là qu'il se qualifie moralement, principe que Thibaud COLLIN (2011) reformule en montrant que l'habitude vertueuse engage la personne tout entière. Le sage, selon ARISTOTE, peut accéder à la connaissance de ces lois cosmiques par la contemplation, c'est-à-dire par un exercice de l'intelligence qui saisit la nature des choses au-delà des apparences.

Les lois sociales ensuite : normes positives et règles morales collectives dont on espère la convergence, sans qu'elle soit toujours garantie. Par exemple, de notre temps, l'exploitation

intensive d'huile de palme peut être légale dans les pays producteurs, tout en conduisant à une déforestation que la conscience morale universelle réprouve.

La loi personnelle enfin, que les Grecs nommaient *auto-nomos*, à l'origine du mot autonomie, désigne la règle que chacun se donne à lui-même. Pour ARISTOTE, c'est précisément cette capacité de gouvernement de soi qui constitue la voie de l'accomplissement humain : devenir vertueux en orientant ses désirs et ses actes vers une fin bonne.

L'articulation aristotélicienne : ordonner l'organisation au réel

1.4.La hiérarchie des lois et la tâche du manager

Dans la pensée aristotélicienne, les trois niveaux de lois que nous venons de distinguer sont non pas juxtaposés, mais emboîtés. La loi personnelle doit s'inscrire dans le cadre des lois sociales qui elles-mêmes doivent converger vers les lois cosmiques. Cette hiérarchie implique que le manager ne peut se contenter d'obéir aux réglementations en vigueur ou de suivre les usages de sa profession. Il lui revient de discerner, dans chaque situation, comment aligner son action sur l'ordre naturel en évitant les déviances, qu'il s'agisse d'infractions caractérisées, de négligences environnementales ou, plus profondément, d'un manque de vertu dans la conduite quotidienne des affaires.

Cette tâche exige avant tout de la volonté : non pas le simple désir, mais la décision ferme de se gouverner vers une fin bonne et de poser, jour après jour, les actes cohérents avec cet objectif. Cette volonté suppose une connaissance authentique du réel, à savoir comprendre la matière, les hommes et les processus dans leur nature propre, à la façon de François MICHELIN qui contemplait la transformation du latex avant même de songer à en tirer profit. Le mot réel vient d'ailleurs du latin *res*, qui a aussi donné résistance : le réel résiste et, bousculer l'ordre cosmique, c'est se heurter à des forces que l'on ne maîtrise pas. François MICHELIN le savait : on ne peut pas traiter le caoutchouc de n'importe quelle façon ; le solliciter au-delà de ses propriétés, c'est fabriquer un pneu qui mettra son utilisateur en danger.

1.5.Le rôle central de la prudence et des vertus éthiques

ARISTOTE confère un rôle central, parmi les vertus, à la prudence (*phronesis*). Elle permet de comprendre ce qu'il convient de faire, dans les circonstances qui se présentent, notamment lorsque la loi a été écrite trop à la hâte, que deux lois se contredisent, ou bien même qu'aucune loi n'a été écrite. Sa singularité tient à sa double nature : intellectuelle d'abord, parce qu'elle relève de la raison ; pratique ensuite, parce qu'elle s'exerce toujours dans la réalité concrète d'une situation particulière. Elle n'est pas isolée : elle oriente les vertus éthiques, telles que le courage, la tempérance, la justice et la libéralité, en discernant, dans chaque circonstance, le juste milieu.

Pour le manager, la prudence se traduit par une capacité à évaluer les conséquences de ses décisions dans toute leur complexité économique, sociale, environnementale. Confronté à un dilemme entre des impératifs financiers à court terme et des enjeux de durabilité, le manager guidé par la prudence ne cherche pas une règle préétablie : il évalue les coûts cachés de chaque option et cherche la voie qui s'aligne sur l'ordre naturel tel que ARISTOTE le conçoit.

Implications pour un management durable

L'une des tentations les plus tenaces du management contemporain réside dans la réduction de la durabilité à une logique de conformité. Les entreprises se dotent de chartes éthiques, de

codes de conduite et d'indicateurs de responsabilité sociale ou environnementale. Pourtant, une telle approche, bien que nécessaire, reste insuffisante : la conformité aux normes ne saurait se substituer à une éthique véritablement incarnée où les principes sont non pas de simples contraintes extérieures mais le fruit d'une pratique quotidienne.

Un management durable inspiré par la pensée aristotélicienne exige une transformation profonde du caractère des acteurs. Cela suppose que les managers soient formés non seulement aux outils de gestion mais aussi à l'exercice du jugement moral dans une formation qui s'inscrit dans la durée, combinant la réflexion philosophique et l'analyse de situations concrètes. Les systèmes d'évaluation doivent également intégrer des critères qui dépassent la seule performance financière en valorisant les comportements vertueux, qu'il s'agisse de la prise en compte des effets sociaux et environnementaux, de la bienveillance dans les relations professionnelles ou de la capacité à résister aux tentations de la facilité ou du compromis.

Cette relecture dessine un profil du manager engagé dans une démarche durable bien différent de celui du simple gestionnaire de conformité. Autrement dit, il cherche activement à orienter son action vers ce que ARISTOTE nomme le souverain bien (*eudaimonia*), au lieu de se contenter des biens extérieurs que sont les honneurs, les richesses et les plaisirs ou, pour le dire dans les termes d'aujourd'hui, il cherche à « *réussir sa vie* » plutôt qu'à seulement « *réussir dans la vie* ».

Conclusion

Les échanges du colloque « Management Durable » ont confirmé qu'il existe, dans le monde industriel et académique, une réelle volonté de repenser les pratiques managériales à l'aune d'exigences éthiques et environnementales. La philosophie aristotélicienne, par sa rigueur et son ancrage dans le réel, offre un cadre pour articuler les trois grandes questions du management durable : que voulons-nous faire (éthique) ? Comment l'organiser (industrie) ? Dans quel cadre nous y astreindre (loi) ? La réponse tient en une formule : s'ordonner soi-même et ordonner son organisation à l'ordre universel, par la volonté d'abord, puis sous la conduite de la prudence qui oriente chaque vertu vers son juste accomplissement : telle est, du moins, la perspective qu'ouvre la philosophie aristotélicienne. Il y a là, assurément, des raisons d'espérer.

Références bibliographiques

ARISTOTE. *Éthique à Nicomaque*. Traduction de Jean VANIER, in Vanier (2000), voir ci-dessous.

COLLIN T. (2011). *La personne humaine*. Permanences, 484-485.

DIANINE-HAVARD A. (2012). *Créé pour la grandeur — le leadership comme idéal de vie*. Le Laurier.

VANIER J. (2000). *Le goût du bonheur — au fondement de la morale avec ARISTOTE*. Presses de la Renaissance. [Réédition poche : Albin Michel, 2018.]

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

Les finalités éthiques du droit de la compliance

Marie-Emma BOURSIER

Professeurs des universités (droit privé, sciences criminelles)

Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - Paris Saclay
DANTE UR 4498

1. Introduction

Les enjeux éthiques de l'entreprise sont soumis à des champs de force nombreux, parfois complémentaires, mais souvent contradictoires. Champs de force tendus entre politiques publiques poursuivies par les États qui imposent aux entreprises de participer à ces finalités éthiques tournées vers le respect de la probité, la vigilance de l'entreprise sur ses impacts environnementaux et sociaux, la protection des données personnelles et compétitivité des entreprises dans le cadre du commerce international.

Ainsi, par exemple, les règles relatives à la lutte contre la corruption peuvent heurter la compétitivité commerciale et industrielle des entreprises. Le déploiement du *Foreign corrupt practicise Act* (FCPA)–américain en 1977 a changé la donne. Cette règlementation conduit aujourd'hui les entreprises à fixer une ligne d'appétence aux risques : entre volonté de gagner des marchés et nécessité d'éviter des sanctions internes mais plus encore étrangères. Les règlementations du droit de la concurrence, de la protection des données personnelles, de la lutte contre le blanchiment de capitaux et le financement du terrorisme ou encore du devoir de vigilance des entreprises sont soumises aux mêmes champs de force[1].

Cette tension entre enjeux éthiques et compétitivité économique est le fruit d'une nouvelle modalité d'intervention des États.

De la catastrophe de Bhopal en 1983 à l'affaire du Rana Plaza en 2013, la mondialisation a révélé la nécessité de mieux protéger les droits humains. La responsabilité des entreprises a été pointée du doigt par l'opinion publique internationale, d'autant que le développement des entreprises multinationales engendre un risque d'impunité pour les faits d'atteinte aux droits humains commise au sein de leur chaîne de valeur.

Ces risques sont d'autant plus importants qu'il existe trois obstacles majeurs à l'engagement de la responsabilité des sociétés mères.

Le premier obstacle est lié au voile de la personnalité morale des filiales ; le second obstacle aux contrats successifs qui forment cette chaîne de valeur ; le troisième obstacle est enfin lié à l'application des règles de conflit de lois en matière délictuelle, qui se résout en appréciant le

[1] M-E BOURSIER, Code la compliance, Dalloz, 2026.

comportement de l'entreprise par rapport à un droit local souvent bien moins protecteur des droits de l'homme.

Face à ces risques, les États ont réagi non seulement pour s'adapter mais aussi pour regagner du terrain dans un contexte polycentrique dans lequel des opérateurs économiques superpuissants bousculent leurs souverainetés.

Les États ont fait évoluer les instruments à leur disposition pour s'assurer de la participation des entreprises à ces missions d'intérêt général, car ce sont elles qui sont les mieux à même de connaître et de détecter les comportements redoutés et combattus par le législateur[2].

C'est dans le prolongement des concepts d'auto-régulation et de régulation nés dans les années soixante-dix, de supervision évoquée à l'instant, que le droit de la compliance a émergé en France et dans l'Union européenne suivant l'évolution du droit américain. Ainsi, le droit de la compliance sollicite-t-il aujourd'hui largement les entreprises afin qu'elles assistent les autorités publiques dans la conduite de leurs missions.

Le droit de la compliance concourt dès lors à la diffusion des valeurs éthiques des politiques publiques portées par les États. Il place l'entreprise dans une situation nouvelle : celle d'un sujet de droit appelé à dépasser son objet social pour embrasser une finalité éthique et pour le faire savoir à ses actionnaires et à ses clients.

L'évolution de la place de l'entreprise intégrant les enjeux sociaux et environnementaux dans sa stratégie est illustrée par la loi PACTE[3]. La loi modifie la définition de l'intérêt social et consacre l'existence des sociétés à mission qui choisissent d'insérer dans leurs statuts une raison d'être touchant à la protection des droits humains, la lutte contre les discriminations ou encore la protection de l'environnement.

C'est dire si le droit de la compliance qui engage depuis quelques années un mouvement de fond place l'éthique au cœur des obligations de l'entreprise en matière de gouvernance comme de fonctionnement (I) ; mouvement qui s'illustre particulièrement avec l'émergence de l'obligation de vigilance (II).

2. Le droit de la compliance ou les exigences éthiques imposées à l'entreprise.

On sait que la distinction entre la morale et l'éthique est fondée sur la morale de Kant, qui sépare les principes de détermination du vouloir entre le matériel — qui est particulier parce qu'il se rattache à la sensibilité — et les principes formels — qui sont universels et rationnels.

Jürgen HABERMAS s'appuie sur cette distinction kantienne entre principes matériels et principes formels pour distinguer la morale — qui se rattache aux principes formels — de l'éthique — qui se rattache aux principes matériels.

Ainsi définie, cette éthique appliquée à la vie des affaires implique la prise en compte des intérêts d'autrui par la société, notamment des intérêts sociaux et environnementaux comme le montre le nouvel article 1833 du Code civil dans sa rédaction issue de la loi PACTE.

Le continuum avec la compliance est naturel car les entreprises doivent mettre en place, au titre des règles de compliance, des programmes de conformité qui incluent systématiquement

[2] M.E BOURSIER, Droit pénal des affaires internationales et compliance, 2ème éd., Précis Joly, Lextenso, 2020.
[3] Loi n° 2019-486 du 22 mai 2019 relative à la croissance et la transformation des entreprises dite loi PACTE pour Plan d'Action pour la Croissance et la Transformation des Entreprise.

des chartes éthiques et des codes de conduite. Ces chartes et codes acquièrent de ce fait une valeur juridique, la loi imposant leur incorporation dans le règlement intérieur de l'entreprise afin d'assurer la sanction disciplinaire des salariés qui y contreviennent (V. exemple art. 17 de la L. n° 2016-1691 du 9 déc. 2016).

La compliance sert donc des objectifs et des finalités variés, qui ne sont pas des buts monumentaux mais tout simplement qui sont des finalités d'intérêt général différentes des mécanismes traditionnels par lesquels la puissance publique délègue à des personnes privées un certain nombre de missions, parfois proches du cœur de la souveraineté de l'État[4].

Dès lors, c'est bien au-delà des mécanismes classiques de délégation de service public du droit administratif, que la compliance conduit les entreprises à adopter et poursuivre des finalités éthiques comme le montre la transformation des finalités de la Responsabilité Sociale des Entreprises[5]- en règles sanctionnées par la consécration d'un devoir de vigilance des entreprises[6].

3. Le devoir de vigilance ou les finalités éthiques poursuivies par l'entreprise.

Dans le prolongement des textes internationaux relatifs à la protection des droits humains, le législateur français a consacré un devoir de vigilance qui substitue aux engagements jusqu'alors volontaires de certaines entreprises (codes de conduite, chartes éthiques) un corpus de règles juridiquement contraignantes[7].

L'objectif est de prévenir les atteintes graves aux droits humains, aux libertés fondamentales, à la santé et la sécurité des personnes, et à l'environnement dans le cadre non seulement des activités des entreprises, mais aussi des sociétés qu'elles contrôlent, des sous-traitants ou fournisseurs avec lesquels elles entretiennent une relation commerciale établie.

Le champ d'application de l'obligation de vigilance assure un rayonnement important de la loi française permettant de dépasser les obstacles liés au voile de la personnalité morale des filiales et à la multiplicité des contrats liant l'entreprise donneuse d'ordre à ses filiales, fournisseurs et sous-traitants.

Les éléments guidant la mise en œuvre effective des plans de vigilance s'appuient sur les meilleures pratiques des entreprises, les guides de l'OCDE sur le devoir de diligence ou encore les principes directeurs des Nations Unies relatifs aux entreprises et aux droits de l'Homme.

La mise en œuvre effective du plan de vigilance constitue une obligation de moyens pour les entreprises, qui doivent dès lors démontrer le déploiement des instruments nécessaires afin

[4] Par exemple, sous l'Ancien Régime les missions déléguées par la Couronne à la Ferme générale, et aujourd'hui, la délégation par l'État et les collectivités territoriales à des entreprises privées de l'exécution de nombreuses missions matérielles en lien avec l'ordre public

[5] La RSE prend sa source aux Principes directeurs sur les droits de l'Homme et les entreprises du Conseil des droits de l'Homme des Nations unies, des Principes directeurs de l'Organisation de coopération et de développement économiques et les mécanismes de suivi internationaux de droit doux, dont le point de contact national (PCN) de l'OCDE, dont la mission est la promotion des principes directeurs et le traitement de saisines de parties prenantes relatives au non-respect de ces principes par les multinationales françaises à l'étranger.

[6] Loi n° 2017-399 du 27 mars 2017 relative au devoir de vigilance des sociétés mères et des entreprises donneuses d'ordre.

[7] Loi n° 2017-339 du 27 mars 2017 et les articles L.225-102-4 et L. 225-102-5 du Code de commerce.

d'identifier les risques et de prévenir les atteintes graves aux droits humains, aux libertés fondamentales, à la sécurité et à la santé des personnes et à l'environnement.

Les plans de vigilance contiennent nécessairement un code de bonne conduite, une cartographie des risques destinée à leur identification, leur analyse et leur hiérarchisation ; des procédures d'évaluation régulière de la situation des filiales, une procédure d'alerte…

Ces instruments sont communs au traitement d'autres risques comme le risque de corruption[8], la lutte contre le blanchiment de capitaux et le financement du terrorisme ou encore le régime du lanceur d'alerte[9]. Ils sont également déjà éprouvés avec les obligations d'information en matière de durabilité[10].

L'éclosion du contentieux[11].[12] avec les premières décisions rendues à propos de la recevabilité des mises en demeure de se conformer aux exigences du plan de vigilance ont soulevé une question de compétence – tranchée depuis par la loi n° 2021-1729 du 22 décembre 2021 pour la confiance dans l'institution judiciaire - et de nombreuses questions relatives aux contours de l'action et à sa recevabilité.

Questions que la Cour d'appel de Paris a tranchées dans un arrêt du 18 juin 2024 dans le cadre de l'appel contre trois décisions d'irrecevabilité dans les affaires Total Energies, EDF, Suez/ Vigie Groupe[13].

[8]Lois n° 2016-1691 du 9 décembre 2016 relative à la transparence, à la lutte contre la corruption et à la modernisation de la vie économique

[9]Loi n° 2022-401 du 21 mars 2022 visant à améliorer la protection des lanceurs d'alerte transposant la directive européenne (UE) 2019/1937 sur la protection des lanceurs d'alerte

[10] Ordonnance n° 2023-1142 du 6 décembre 2023 relative à la publication et à la certification d'informations en matière de durabilité et aux obligations environnementales, sociales et de gouvernement d'entreprise des sociétés commerciales et par son décret d'application no 2023-1394 du 30 décembre 2023

[11] Le lundi 24 juin 2019, quatre associations ougandaises ont mis en demeure un groupe pétrolier français de se conformer à la loi relative au devoir de vigilance des multinationales concernant un important projet pétrolier en Ouganda. En effet, selon ces associations, plusieurs enquêtes et études commandées par leurs soins tendaient à démontrer que ce projet pétrolier engendrerait des atteintes graves aux droits humains d'une part, et menacerait un parc naturel, d'autre part. Il était enjoint au groupe pétrolier de combler les lacunes et défaillances de son plan de vigilance actuel, lequel ne comprendrait aucune identification réelle des risques, ni de mesures spécifiques concernant ses activités en Ouganda.

[12] De la même façon, le 18 juillet 2019, une entreprise du secteur de l'externalisation des centres d'appels a été destinataire d'une lettre de mise en demeure émise par une ONG et une fédération syndicale internationale pour manquement à son devoir de vigilance. Il était reproché à la multinationale d'avoir insuffisamment pris en compte dans son plan de vigilance les risques d'atteintes graves aux droits des travailleurs dans plusieurs de ses filiales à l'étranger. Ainsi la secrétaire générale de l'ONG a pu déclarer que la société « [avait] *décidé de mener ses activités dans des pays souvent peu respectueux des droits humains (Inde, Philippines, Colombie et Mexique). Dans ce contexte, il lui* [revenait] *d'adopter un plan crédible et holistique, pour empêcher que ces risques ne deviennent réalité* ». Elle déplorait également « *une cartographie insuffisante des risques, l'absence de mesures concrètes pour garantir les droits humains, aucune consultation avec les parties prenantes, et aucune consultation avec les syndicats français sur le mécanisme d'alerte* ».

[13] Paris, pôle 5, ch. 12, 18 juin 2024, n° 23/14348, 21/22319 et 23/10583. Elle confirme que la mise en demeure est une condition préalable et nécessaire à la recevabilité de l'action sans impliquer la nécessité d'une quelconque conciliation. Elle précise ensuite que la révision du plan de vigilance par l'entreprise au cours de la procédure n'entraîne pas l'irrecevabilité de l'action tant que la mise en demeure et l'assignation, sans porter sur le même plan de vigilance, visent les mêmes obligations (Paris, pôle 5, ch. 12, 18 juin 2024, n° 23/14348, 21/22319 et 23/10583). La Cour d'appel précise aussi que les mesures d'injonction qui sont ultérieurement présentées au juge doivent viser en substance les mêmes obligations que celles ayant fait l'objet de la mise en

Le contentieux au fond a été inauguré en première instance par le Tribunal judiciaire de Paris le 5 décembre 2023 dans une décision concernant La Poste, qui a ordonné une mise en conformité sous astreinte de la société.

Cette décision a été confirmée par la Cour d'appel de Paris dans sa formation dédiée aux contentieux émergents dans un arrêt rendu le 17 juin 2025[14].

Confirmant la décision de première instance jugeant le plan de vigilance de la Poste insuffisant au regard des exigences légales, la Cour d'appel confirme donc l'injonction ordonnant à La Poste de compléter son plan de vigilance en établissant une cartographie des risques identifiant, analysant et hiérarchisant les dangers (droits humains, santé, environnement), en mettant en place des procédures d'évaluation précises pour les sous-traitants et fournisseurs, en élaborant un mécanisme d'alerte concerté avec les syndicats, et en mettant en place un dispositif de suivi efficace et utile pour orienter les mesures futures.

Mais nous passons là à ce qu'est la compliance opérationnelle….

En conclusion, le contentieux émergeant du devoir de vigilance, la responsabilité civile extracontractuelle, les nouvelles sanctions en cas de manquement à l'obligation de vigilance[15] démontrent, quel que soit le reflux actuel[16] du droit de l'Union européenne à propos de la directive CS3D[17], que le droit de la compliance intègre pleinement des préoccupations éthiques au titre de devoirs juridiquement sanctionnés.

demeure ; et s'y rattacher « *avec un lien suffisant* ». Il s'agit pour la Cour de viser les mêmes catégories de risques, d'atteintes relevées aux droits humains ou à l'environnement.
Sur la qualité de partie à l'action, la Cour précise dans l'affaire Suez (Paris, pôle 5, ch. 12, 18 juin 2024, n° 23/14348, 21/22319 et 23/10583) que la recevabilité de l'action est conditionnée par un intérêt à agir qui suppose la démonstration par chaque collectivité territoriale demandeuse d'un intérêt public local concrétisé par une atteinte spécifique sur son territoire.
Quant au débiteur de l'action, la Cour précise que, dans le cadre des groupes de sociétés, seule la société mère est « *débitrice naturelle et inconditionnelle* » de l'obligation de publier et de mettre en œuvre le plan de vigilance en tant qu'entité qui dispose des pouvoirs et de l'influence nécessaires pour conformer à la loi.

[14] Paris, ch. 5-12, 17 juin 2025 (n° 24/05193).

[15] Deux nouvelles sanctions applicables depuis le 1er janvier 2025 aux articles L.2141-7-1 et L.3123-7-1 du Code de la commande publique issues de la loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets qui introduisent des peines d'exclusion de la procédure de passation d'un marché public et d'exclusion d'un contrat de concession publique en cas de violation de l'obligation de vigilance prévue à l'article L.225-102-1 (anc. art. L.225-102-4) du Code de commerce.

[16] La directive dite *Stop the clock* (UE) 2025/794 du 14 avril 2025 reporte dans l'attente de cette révision la date de transposition de la directive sur le devoir de vigilance (CS3D) prévue initialement au 26 juillet 2026 ainsi que des dispositions d'ores et déjà transposées de la directive sur la durabilité (CSRD) applicables depuis le 1er janvier 2024. Ce report a été intégré au droit français par la loi dite DDADUE loi n° 2025-391 du 30 avril 2025 portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne en matières économique, financière, environnementale, énergétique, de transport, de santé et de circulation des personnes.

[17] Directive (UE) 2024/1760 du 13 juin 2024 sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité dite CS3D.

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

Mesurer et institutionnaliser la légitimité : architecture délibérative et contractualisation au service d'une éthique industrielle opérationnelle



Jean-Claude LOPEZ

Directeur adjoint à l'IUT de Mantes-en-Yvelines (UVSQ)

Co-directeur Master 2 Transition Industrielle, Écologie et Territoires (TIET)

Doctorat en sciences de gestion et du management

Résumé

Cet article propose un cadre d'éthique industrielle opérationnelle destiné à mesurer et institutionnaliser la légitimité territoriale des projets. À partir d'une revue documentaire intégrative, il relie trois ensembles de travaux généralement traités séparément : la *Social Licence to Operate* (SLO), la justice procédurale et la médiation multipartite, puis la contractualisation des engagements dans les dispositifs de gouvernance et les cadres européens de durabilité. La contribution consiste non pas à proposer une nouvelle définition de la SLO, mais à montrer comment une acceptation informelle, continue et révocable peut devenir une capacité institutionnelle observable : une « *SLO-in-law* ». Le modèle articule cinq leviers — médiation *ex ante*, convention territoriale, mécanisme de plainte, comité de suivi doté d'une capacité d'ajustement et arrimage juridique — et précise les traces permettant d'en tester l'effectivité. Les illustrations issues de l'énergie, du textile, de la méthanisation et du tourisme montrent que le territoire est non pas un simple lieu d'implantation, mais l'espace où se confrontent les usages, les intérêts, les normes et les perceptions de justice. Le cadre reste conceptuel : sa validité prédictive sur les retards, les surcoûts et les dépréciations d'actifs doit désormais être éprouvée empiriquement.

Mots-clés :

Éthique industrielle ; *Social Licence to Operate* ; légitimité territoriale ; justice procédurale ; médiation ; gouvernance multipartite ; actifs échoués ; contractualisation ; CSRD ; ESRS ; CSDDD.

Introduction

La légalité d'un projet ne suffit plus à garantir sa continuité. Une usine, une infrastructure énergétique, une unité de traitement ou un équipement touristique peuvent disposer de toutes les autorisations requises et demeurer néanmoins contestés. La *Social Licence to Operate* (SLO) désigne cette acceptation informelle, continue et révocable qui se construit au-delà du droit positif, à partir de la confiance, de la légitimité perçue et de la qualité des relations avec les parties prenantes (STUART et al., 2023 ; STRONGE et al., 2024). Elle ne constitue donc ni un permis supplémentaire ni un consensus définitif. Elle décrit une relation dont la stabilité dépend de la manière dont les impacts et les arbitrages sont discutés.

Cette relation est territoriale. Le territoire n'est pas ici un simple périmètre géographique : il est l'espace dans lequel se rencontrent des usages, des ressources, des identités, des intérêts économiques et des décisions publiques. Les controverses sur l'éolien en mer, la méthanisation, les chaînes textiles ou les meublés touristiques ont des objets différents, mais elles posent une même question : qui supporte les coûts, qui reçoit les bénéfices et qui peut effectivement peser sur la décision ? Lorsqu'une réponse crédible n'est pas apportée, la

contestation peut produire des retards, des surcoûts, des restrictions réglementaires, une perte de réputation ou une sous-utilisation de l'actif. L'actif échoué devient alors le symptôme économique d'un contrat territorial fragilisé (CALDECOTT, 2018 ; *Ausserladscheider*, 2024).

La littérature récente a clarifié la formation des jugements de SLO (STUART et al., 2023), proposé des cadres pour construire des relations dignes de confiance (STRONGE et al., 2024) et invité à dépasser une lecture exclusivement managériale pour considérer la SLO comme une institution collective et située (GLÜCKLER & GUTIÉRREZ, 2025). Parallèlement, les recherches sur le dialogue avec les parties prenantes montrent qu'un échange ne devient véritablement délibératif que s'il permet l'expression de désaccords, la justification des décisions et leur révision (ACUTI et al., 2024). Enfin, les travaux sur les initiatives multipartites soulignent que leur légitimité dépend moins de la proclamation d'engagements que de l'architecture du dispositif et de ses effets sur le système de gouvernance dans lequel elles s'insèrent (APFFELSTAEDT et al., 2024).

L'apport de cet article est une contribution d'architecture. Il s'agit non pas d'ajouter un modèle général de la SLO aux synthèses existantes, mais de relier la délibération, la contractualisation et la mesure dans un cadre territorial unique.

Trois questions structurent l'analyse :

1) Par quels mécanismes une controverse territoriale peut-elle fragiliser la trajectoire économique d'un projet jusqu'à produire un risque d'actif échoué ?

2) Comment une architecture délibérative fondée sur la justice procédurale et la médiation peut-elle stabiliser la SLO ?

3) À quelles conditions les engagements issus du dialogue deviennent-ils mesurables, opposables et gouvernables ?

1. Méthodologie : une revue documentaire intégrative

La recherche repose sur une revue documentaire intégrative, sans collecte de données de terrain. Le *corpus* couvre principalement la période 2017-2025 et associe des articles académiques, des textes juridiques européens et français, ainsi que des documents institutionnels. Les recherches ont été conduites dans *Web of Science*, *Scopus*, *Business Source Complete*, EconLit et *Cairn.info*, puis complétées par EUR-Lex, Legifrance, la Commission nationale du débat public, l'ADEME, la Cour des comptes européenne et l'*International Accord*. Les requêtes ont combiné les notions de SLO, légitimité, justice procédurale, médiation, initiatives multipartites, actifs échoués, CSRD, ESRS et devoir de vigilance.

La synthèse est concept-centrée : les textes sont rapprochés en fonction des mécanismes qu'ils documentent plutôt que présentés successivement par auteurs (WEBSTER & WATSON, 2002 ; Snyder, 2019). La démarche s'inspire des standards de revue systématique en management, tout en restant adaptée à une finalité de construction conceptuelle (TRANFIELD et al., 2003). Quatre axes ont guidé l'extraction : les conditions de justice procédurale, les dispositifs de médiation et de négociation, la mise en forme contractuelle des engagements et les effets possibles sur la trajectoire économique des actifs. Les sources académiques ont été retenues selon leur évaluation par les pairs, leur cohérence méthodologique et leur actualité ; les sources juridiques et institutionnelles selon l'autorité de

l'émetteur et leur traçabilité. Cette explicitation vise à limiter, sans prétendre les supprimer, les biais de sélection et de confirmation (BOOTH et al., 2016). Les articles de presse présents dans la version initiale ont été retirés de l'argumentation centrale.

Cette méthode permet une triangulation entre littérature, droit et dispositifs de gouvernance, mais elle comporte trois limites. Premièrement, les exemples mobilisés sont des illustrations analytiques et non des études de cas comparatives. Deuxièmement, la sélection reste exposée à des biais de confirmation malgré l'explicitation des critères. Troisièmement, l'hétérogénéité des métriques de SLO empêche de conclure à la validité prédictive du modèle. Le caractère « opérationnel » désigne donc ici une architecture testable et instrumentable, et non un dispositif déjà validé empiriquement.

2. De la controverse territoriale au risque d'actif échoué

Les actifs échoués sont des investissements qui subissent une dévalorisation prématurée ou deviennent des passifs sous l'effet de changements réglementaires, environnementaux, technologiques ou sociaux (CALDECOTT, 2018). Leur analyse a d'abord concerné les actifs fossiles. Elle s'est progressivement élargie aux infrastructures, aux permis, aux marques et aux relations qui conditionnent l'exploitation. Cette extension est décisive : l'échouage n'est pas seulement un résultat comptable, c'est aussi un processus au cours duquel la capacité d'agir se réduit (*Ausserladscheider*, 2024).

La SLO intervient dans ce processus comme variable relationnelle. Une contestation ne produit pas mécaniquement un actif échoué. Elle devient économiquement matérielle lorsqu'elle modifie la durée du projet, son coût, son autorisation, son financement ou sa réputation. Dans l'éolien en mer, par exemple, les conflits d'usage et la perception d'une répartition inéquitable des bénéfices peuvent allonger les calendriers et imposer des ajustements. Dans la méthanisation, la qualité de l'information et la prise en compte des nuisances perçues influencent la continuité du projet (ADEME, 2018). Dans le textile, les atteintes aux droits sociaux fragilisent simultanément les fournisseurs, les marques et la légitimité de la filière ; l'International Accord montre qu'une réponse collective devient plus crédible lorsque les inspections, les plaintes et les remédiations sont organisées et exécutoires. Dans le tourisme, la loi française du 19 novembre 2024 traduit dans le droit une contestation territoriale portant sur l'équilibre entre logement, activité économique et usages locaux (Loi n° 2024-1039, 2024). La trajectoire des jugements dépend également de l'environnement informationnel et médiatique dans lequel le dialogue se déroule (DOROBANTU et al., 2024).

Ces situations permettent d'identifier une chaîne de mécanismes : impacts ou risques mal répartis ; information jugée insuffisante ; sentiment de ne pas être entendu ; perte de confiance ; mobilisation et contentieux ; durcissement réglementaire ou révision du projet ; enfin, dévalorisation matérielle ou immatérielle. La chaîne n'est pas linéaire, mais elle met au jour un point central : le risque d'échouage augmente lorsque les parties prenantes ne disposent ni d'un espace crédible de discussion ni d'une voie effective de correction. L'éthique industrielle devient alors une question de gouvernance de la preuve, de la décision et de la réparation.

3. Architecture délibérative pour stabiliser la SLO

La justice procédurale désigne la perception selon laquelle la décision est prise au terme d'un processus équitable : accès à une information compréhensible, possibilité de participer, impartialité du traitement, justification des arbitrages et capacité de révision. Elle ne garantit

pas l'accord sur le résultat, elle conditionne l'acceptation d'une décision contestée. Les travaux sur le dialogue avec les parties prenantes confirment qu'un dispositif purement informatif ou centré sur la communication de l'entreprise ne suffit pas (ACUTI et al., 2024).

La médiation *ex ante* constitue une première traduction opérationnelle de cette exigence. Elle intervient avant la cristallisation du conflit, avec un tiers dont l'indépendance, le mandat et les règles d'intervention sont explicites. Son objectif n'est pas d'effacer les divergences, il est de produire un terrain commun — un *common ground* — c'est-à-dire un socle minimal de faits, de définitions et de règles permettant de poursuivre la discussion. GRIMM et al. (2024) montrent que les facilitateurs construisent ce terrain commun en rapprochant des groupes qui ne partagent ni le même langage ni les mêmes temporalités.

La médiation doit cependant être reliée à une architecture plus large. La Charte de la participation du public et les pratiques de la CNDP formalisent des principes de transparence, d'inclusion et de reddition de comptes. Les initiatives multipartites ajoutent une dimension sectorielle : elles mettent en relation entreprises, pouvoirs publics, syndicats, associations et communautés autour de standards communs. Elles prolongent ainsi les travaux qui placent l'engagement des parties prenantes dans une dynamique continue, et non dans une consultation ponctuelle (KUJALA et al., 2022). APFFELSTAEDT et al. (2024) soulignent que leur légitimité doit être appréciée à la fois à l'intérieur du dispositif et dans ses interactions avec le système de gouvernance global. Une instance peut être inclusive en apparence tout en restant sans effet sur la décision. Les résultats observés dans certaines initiatives climatiques suggèrent d'ailleurs que l'adhésion ne produit des effets que lorsque la gouvernance et le suivi sont suffisamment structurés (ROMITO et al., 2024).

Trois propriétés sont donc nécessaires. Le dispositif doit d'abord être inclusif : les catégories affectées doivent être représentées et disposer de moyens de participation. Il doit ensuite être conséquent : les contributions doivent pouvoir modifier le projet ou déclencher une réponse motivée. Il doit enfin être révisable : les engagements et les indicateurs doivent être réexaminés lorsque les impacts évoluent. À ces conditions, la délibération ne relève plus d'une communication périphérique, elle devient une technologie de réduction de l'incertitude territoriale.

4. De la délibération à la « *SLO-in-law* »

La principale fragilité des démarches d'acceptabilité tient à l'écart entre la parole et l'exécution. Une charte peut améliorer la qualité du dialogue sans modifier les droits, les obligations ou les arbitrages budgétaires. La notion de « *SLO-in-law* » proposée ici désigne le passage d'une légitimité diffuse à une capacité institutionnelle : les attentes sont traduites en procédures, en clauses, en mécanismes de plainte, en responsabilités et en traces auditables.

Cette évolution emprunte trois voies complémentaires. La première est contractuelle. Des clauses de médiation, des délais de réponse, des obligations de publication, des mécanismes d'escalade ou des conditions de remédiation peuvent être intégrés aux conventions, aux marchés, aux relations de filière ou aux financements. L'International Accord illustre cette transformation : les inspections indépendantes et les obligations correctives donnent une portée effective à des engagements collectifs.

La deuxième voie est réglementaire. La CSRD et les ESRS ont installé une logique de double matérialité et de documentation des impacts, risques et opportunités (Directive (UE) 2022/2464). La directive sur le devoir de vigilance en matière de durabilité, dans sa version

consolidée après les simplifications de 2025 et 2026, maintient pour les entreprises relevant de son champ une obligation d'identifier et de traiter les incidences négatives dans leurs chaînes d'activités (Directive (UE) 2024/1760, version consolidée en 2026). Ces cadres ne créent pas juridiquement une SLO, mais ils renforcent la traçabilité des impacts et des réponses. Ils rendent plus difficile la séparation entre dialogue territorial, gouvernance des risques et décision d'investissement.

La troisième voie est territoriale. Les engagements peuvent être inscrits dans une convention de projet, un comité de suivi, un fonds de compensation ou une clause de révision. Le territoire devient ainsi un niveau d'institutionnalisation, non parce qu'il disposerait d'une volonté unique, mais parce qu'il organise la confrontation entre intérêts légitimes et permet d'attribuer les responsabilités. La *SLO-in-law* ne signifie donc pas la juridicisation complète de la confiance. Elle consiste à rendre vérifiables les conditions qui la soutiennent.

5. Un modèle opérationnel, ses indicateurs et ses conditions de testabilité

Le cadre proposé repose sur cinq leviers. Ils sont modulaires : tous les projets n'exigent pas la même intensité de gouvernance, mais chaque levier répond à une vulnérabilité identifiée. Le tableau 1 reprend les éléments essentiels qui figuraient initialement en annexe et les replace dans le corps de la démonstration.

Tableau 1. Architecture opérationnelle de la SLO-in-law

Levier	Fonction territoriale	Traces et indicateurs	Conditions de mise en œuvre
1. Médiation *ex ante*	Construire un terrain commun avant la cristallisation du conflit.	Délai de réponse ; représentativité de la participation ; médiations tenues/prévues.	Tiers indépendant ; mandat écrit ; calendrier ; budget identifié.
2. Convention territoriale	Traduire les compromis en engagements traçables et révisables.	Part des engagements attribués et publiés ; nombre d'amendements issus du dialogue.	Périmètre et signataires explicites ; clause de révision ; bilan public.
3. Plainte et remédiation	Donner aux acteurs affectés une voie effective de correction.	Griefs recevables résolus ; délai de remédiation ; taux de récurrence.	Canal accessible ; protection contre les représailles ; escalade indépendante.
4. Comité multi-acteurs et fonds d'ajustement	Organiser le suivi collectif et financer les corrections nécessaires.	Décisions exécutées ; CAPEX/OPEX reconfigurés ; déclenchements du fonds.	Représentation équilibrée ; pouvoir de décision ; seuils prédéfinis.
5. Arrimage juridique et reporting	Relier les engagements territoriaux aux contrats, autorisations et décisions d'investissement.	Engagements contractualisés ; documentation ESRS ; audits et covenants respectés.	Cartographie juridique ; propriétaire des données ; auditabilité ; sanctions.

Ces indicateurs ne mesurent pas directement la légitimité comme une grandeur objective. Ils mesurent les conditions procédurales de sa construction et la capacité de l'organisation à apprendre. Leur intérêt réside dans la possibilité de relier trois niveaux d'observation. Le premier concerne le processus : représentativité, accès à l'information, délai de réponse, tenue des médiations. Le deuxième concerne les résultats intermédiaires : griefs résolus, engagements exécutés, modifications apportées au projet. Le troisième concerne les effets économiques : retards, surcoûts, contentieux, évolution de la prime de risque ou dépréciation d'actifs.

La testabilité du modèle suppose de ne pas confondre corrélation et causalité. Une amélioration des indicateurs procéduraux peut accompagner une réduction des conflits sans en être la seule cause. Des recherches futures pourraient comparer des projets similaires avec et sans médiation *ex ante*, suivre les indicateurs avant et après une convention territoriale, ou analyser les effets d'un choc réglementaire. La validité prédictive d'un « cockpit SLO » devra être appréciée sur plusieurs projets et dans plusieurs secteurs, avec des données longitudinales.

Cinq conditions de mise en œuvre apparaissent enfin déterminantes : une cartographie des parties prenantes actualisée, une facilitation réellement indépendante, des moyens de participation adaptés aux acteurs les moins dotés, une capacité formelle de correction et une gouvernance des données permettant l'audit. Sans ces conditions, le dispositif peut produire du *process-washing* : l'organisation multiplie les consultations mais conserve l'intégralité du pouvoir de décision et ne documente ni les désaccords ni les corrections.

6. Discussion et conclusion

Notre thèse est simple : l'éthique industrielle devient opérationnelle lorsqu'elle relie la qualité du dialogue à des effets organisationnels, juridiques et économiques. La SLO doit être traitée non pas comme un label détenu par l'entreprise, mais comme une relation collective, située et révisable. Le territoire est central parce qu'il rend visibles les interdépendances : une activité productive y rencontre des usages, des normes publiques, des attachements et des asymétries de pouvoir.

La contribution du cadre tient à l'articulation de trois niveaux jusqu'ici souvent séparés. Le niveau délibératif précise les conditions de justice procédurale. Le niveau contractuel transforme certains engagements en obligations de suivi et de remédiation. Le niveau de pilotage relie ces obligations à des indicateurs et aux décisions d'investissement. Cette architecture permet de dépasser l'opposition entre acceptabilité sociale et performance économique : la légitimité n'est pas un supplément d'âme, elle est une condition de continuité du projet.

Le modèle comporte néanmoins des limites substantielles. Il est construit à partir d'une revue documentaire et non d'une validation de terrain. Son ancrage européen réduit sa transférabilité à des contextes juridiques différents. Les métriques proposées peuvent privilégier ce qui est facilement traçable au détriment d'expériences plus diffuses, notamment celles des groupes peu représentés. Enfin, la contractualisation peut déplacer la discussion vers des experts et réduire la portée politique du désaccord. Institutionnaliser la SLO doit donc signifier non pas neutraliser la controverse, mais lui donner des formes qui permettent la justification, la révision et la réparation.

L'agenda empirique est désormais clair : tester la relation entre qualité procédurale et trajectoire économique ; comparer les effets de différents dispositifs de médiation ; étudier les conditions territoriales de leur appropriation ; examiner enfin la manière dont les indicateurs influencent réellement les arbitrages des comités d'investissement. La *SLO-in-law* doit être évaluée non à l'aune du nombre de réunions organisées, mais à l'aune de sa capacité à rendre les décisions discutables, les engagements vérifiables et les corrections effectives. C'est à cette condition que la légitimité peut devenir une ressource de résilience plutôt qu'un discours ajouté après la décision.

Références bibliographiques

ACUTI D., Glozer, S., & Crane, A. (2024). What is (and is not) stakeholder dialogue in CSR? A review and research agenda. International Journal of Management Reviews, 26(4), 518–535. https://doi.org/10.1111/ijmr.12363

ADEME. (2018). Informer et dialoguer autour d'un projet de méthanisation : bonnes pratiques à l'attention des agriculteurs porteurs de projets. https://expertises.ademe.fr/

APFFELSTAEDT K., SCHRAGE S. & GILBERT D. U. (2024). Multi-stakeholder initiatives and legitimacy: A deliberative systems perspective. Business Ethics Quarterly, 34(3), 375–408. https://doi.org/10.1017/beq.2023.12

Ausserladscheider, V. (2024). Towards a sociology of stranded assets. Journal of Cultural Economy, 17(1), 141–146. https://doi.org/10.1080/17530350.2024.2306253

BOOTH A., SUTTON A. & PAPAIOANNOU D. (2016). Systematic approaches to a successful literature review (2nd ed.). Sage.

CALDECOTT B. (Ed.). (2018). Stranded assets and the environment: Risk, resilience and opportunity. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315651606

Commission nationale du débat public. (2016). Charte de la participation du public. https://www.ecologie.gouv.fr/charte-participation-public

Commission nationale du débat public. (2024). La mer en débat : bilan et enseignements du débat public éolien en mer 2023–2024. https://www.debatpublic.fr/la-mer-en-debat

Directive (UE) 2022/2464 du Parlement européen et du Conseil du 14 décembre 2022 en ce qui concerne la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises. (2022). Journal officiel de l'Union européenne, L 322, 15–80. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj

Règlement délégué (UE) 2023/2772 de la Commission du 31 juillet 2023 complétant la directive 2013/34/UE par des normes d'information en matière de durabilité. (2023). Journal officiel de l'Union européenne, L 321, 1–490. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj

Directive (UE) 2024/1760 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité. (2024). Journal officiel de l'Union européenne. Version consolidée au 18 mars 2026. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1760

DOROBANTU S., HENISZ W. J. & NARTEY, L. J. (2024). Firm-stakeholder dialogue and the media: The evolution of stakeholder evaluations in different informational environments. Academy of Management Journal, 67(1), 92–125. https://doi.org/10.5465/amj.2021.0103

GLÜCKLER J. & GUTIÉRREZ D. (2025). Social license to operate: An institutional critique and research framework. Resources Policy, 107, 105657. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105657

GRIMM J., RUEHLE R. C. & REINECKE J. (2024). Building common ground: How facilitators bridge between diverging groups in multi-stakeholder dialogue. Journal of Business Ethics, 194, 583–608. https://doi.org/10.1007/s10551-023-05609-4

International Accord. (2021–2025). International Accord for Health and Safety in the Textile and Garment Industry and Pakistan Accord. https://internationalaccord.org/

KUJALA J., SACHS S., LEINONEN H., HEIKKINEN A. & LAUDE D. (2022). Stakeholder engagement: Past, present, and future. Business & Society, 61(5), 1131–1171. https://doi.org/10.1177/00076503211066595

Loi n° 2024-1039 du 19 novembre 2024 visant à renforcer les outils de régulation des meublés de tourisme à l'échelle locale. (2024). Journal officiel de la République française. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000050612711

ROMITO S., VURRO C. & POGUTZ S. (2024). Joining multi-stakeholder initiatives to fight climate change: The environmental impact of corporate participation in the Science Based Targets initiative. Business Strategy and the Environment, 33(4), 2817–2831. https://doi.org/10.1002/bse.3639

SNYDER H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research, 104, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

STRONGE D. C., Kannemeyer, R. L., & Edwards, P. (2024). Building social licence to operate: A framework for gaining and maintaining meaningful, trustworthy relationships. Resources Policy, 89, 104586. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104586

STUART A., BOND A., FRANCO A. M. A., BAKER J., GERRARD C., DANINO V. & JONES K. (2023). Conceptualising social licence to operate. Resources Policy, 85, 103962. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103962

TRANFIELD D., DENYER D. & SMART P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. British Journal of Management, 14(3), 207–222. https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375

WEBSTER J. & WATSON R. T. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. MIS Quarterly, 26(2), xiii–xxiii.

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

L'innovation au service de la transition énergétique et de la performance d'usage : le cas de l'hydrogène



Patrick SCHEMBRI

Maître de Conférences en sciences économiques

CEARC



Arnault BARICHELLA

Chercheur postdoctoral Université Paris-Saclay

UVSQ

CEARC



Katia RADJA

Maître de conférences HDR en sciences économiques

Laboratoire CEARC

OVSQ - UVSQ - Université Paris-Saclay



Salim SEBAI

Chercheur en moteurs haute performance chez ARAMCO.

Docteur en énergétique et génie de la combustion (Université Paris Nanterre, 2022).

Fadila MAROTEAUX
Professeure à l'IUT de Vélizy (UVSQ)
Docteure en mécanique énergétique (Université Pierre et Marie Curie), HDR.
Co-responsable du projet NESMO.

Résumé

Cet article vise à identifier les verrous et les leviers du déploiement urbain et territorial d'une motorisation hybride rechargeable reposant sur un moteur à combustion interne fonctionnant à l'hydrogène en bicarburation. Au regard de cette solution technologique, la recherche axée sur la problématique de la performance étudiée à différentes échelles montre que les formes alternatives de combustion peuvent contribuer à ladite transition, en proposant une solution d'adaptation pour le parc de véhicules existant. La faisabilité technologique de la solution de motorisation est étudiée selon une approche numérique qui simule la combustion de l'hydrogène en mélange dilué pour une combustion à basse température. Pareille solution est confrontée à plusieurs contraintes en lien notamment avec la combustion de l'hydrogène, la réduction des émissions de NOx et l'intégration de l'injection et du stockage embarqué. Par ailleurs, l'article étudie la performance d'usage de la solution technologique qui répond à des besoins en matière d'autonomie et de commodité, tout en révélant un coût total élevé et des contraintes de compatibilité avec des infrastructures encore peu denses. Du point de vue politique et sociétal, le développement d'un écosystème territorial d'innovation qui intègre la solution de motorisation ne saurait être initié sans une véritable volonté politique, en lien avec la *gouvernance de l'énergie,* par référence notamment à la manière dont les politiques publiques qui accompagnent la transformation des systèmes énergétiques à différentes échelles sont définies, mises en œuvre et évaluées. L'article est structuré en quatre temps. Après avoir explicité le cadre d'analyse mobilisé, il présentera les principaux résultats relatifs aux dimensions techniques et d'usage, puis analysera les verrous et leviers territoriaux identifiés à partir du contexte francilien. La discussion finale proposera des recommandations de gouvernance visant à synchroniser les innovations technologiques, les infrastructures et les stratégies territoriales de transition énergétique.

Mots-clés

Hydrogène ; moteur à combustion interne hydrogène ; motorisation hybride rechargeable ; performance d'usage ; gouvernance multiniveaux ; infrastructures de ravitaillement ; morphologie urbaine.

Introduction

Le secteur des transports constitue l'un des principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre et demeure un levier central des stratégies de transition énergétique. Dans ce contexte, la diversification des vecteurs énergétiques apparaît comme une condition nécessaire à la décarbonation du secteur, compte tenu de la diversité des usages et des contraintes techniques associées (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2025 ; CREUTZIG et al., 2015). En raison de la crise climatique, de nouvelles réglementations ont été adoptées et l'Union européenne (UE) s'est engagée à atteindre la neutralité carbone (European Environment Agency, 2024 ; RUSCHE & SCHAEFER, 2024). En 2019, la Commission européenne a présenté le Pacte vert pour l'Europe, une feuille de route visant à rendre l'Europe climatiquement neutre d'ici 2050 (European Commission, 2019). En 2021, la Commission a dévoilé un paquet climatique visant à traduire les ambitions de neutralité climatique en actions politiques concrètes. Ce paquet législatif, intitulé « *Fit for 55* », a été publié le 14 juillet 2021, en référence à l'objectif de l'UE de réduire ses émissions de carbone de 55 % d'ici 2030 (European Commission, 2021). Ces Directives et ces réglementations visent à progressivement remodeler des secteurs tels que l'automobile, l'aviation, le transport maritime, les énergies renouvelables, l'agriculture, l'industrie, la gestion forestière et l'aménagement du territoire. Si l'électrification des mobilités s'impose aujourd'hui comme l'option dominante à court terme, l'hydrogène suscite un intérêt croissant en tant que vecteur énergétique complémentaire. Il est envisagé non comme un substitut exclusif aux batteries,

mais comme une solution susceptible de répondre à certains usages pour lesquels l'électrification présente des contraintes techniques ou opérationnelles, notamment en matière d'autonomie, de temps de ravitaillement ou de transport de charges lourdes (AJANOVIC & HAAS, 2018). Il paraît donc nécessaire d'articuler l'électrification, les biocarburants et l'hydrogène dans une trajectoire cohérente de décarbonation, plutôt que d'opposer ces solutions.

Le projet de recherche intitulé « Nouvelles Énergies Mobilités Durables » (NESMO)[18] s'inscrit dans cette optique en explorant les perspectives des moteurs thermiques à hydrogène pour réduire les émissions dans le secteur des transports, tout en intégrant dans cette exploration une analyse des conditions institutionnelles et territoriales de leur déploiement. Le projet NESMO (2022–2023) financé par l'Université Paris-Saclay repose sur une collaboration interdisciplinaire associant des équipes en sciences de l'ingénieur, spécialisées dans la modélisation de la combustion hydrogène et dans l'optimisation des systèmes moteurs, ainsi que des chercheurs en sciences humaines et sociales travaillant sur les politiques publiques, l'innovation, la gouvernance territoriale et l'analyse multiniveaux. L'étude empirique a été conduite en Île-de-France, avec une attention portée sur le plateau de Saclay et plusieurs communes présentant des configurations institutionnelles, budgétaires et morphologiques contrastées. À travers le développement d'un modèle de combustion diluée à basse température, l'analyse d'indicateurs territoriaux et la réalisation de quinze entretiens semi-structurés auprès de dix-sept responsables locaux, le projet vise à identifier les conditions techniques, institutionnelles et territoriales du déploiement d'une solution hybride rechargeable fondée sur un moteur thermique fonctionnant à l'hydrogène en bicarburation. L'hydrogène est considéré comme un objet sociotechnique qui s'inscrit dans des dynamiques territoriales différenciées. Pareille technologie hybride rechargeable, qui associe un moteur à combustion interne alimenté à l'hydrogène et une motorisation électrique, vise à tirer parti des avantages respectifs des deux vecteurs énergétiques : la flexibilité d'usage et l'absence d'émissions locales de CO_2 pour l'hydrogène, ainsi que la capacité de circuler en mode électrique dans des environnements contraints et à faibles émissions. Une telle approche pose toutefois immédiatement la question de ses conditions réelles de faisabilité et de diffusion.

L'un des apports centraux du projet NESMO réside dans son positionnement interdisciplinaire. L'évaluation d'une solution hydrogène ne peut se limiter à une analyse strictement technologique de la combustion ou du rendement moteur. Elle doit intégrer la notion de « performance d'usage », entendue ici comme la capacité d'une technologie à répondre concrètement aux attentes des utilisateurs et aux contraintes du contexte territorial. En effet, l'impact environnemental d'une innovation dépend de son adoption effective. Une technologie, aussi performante soit-elle sur le plan expérimental, demeure marginale si elle ne garantit pas une autonomie suffisante, un coût total acceptable et une compatibilité avec les infrastructures disponibles. La solution hybride rechargeable apparaît, dans cette perspective, comme une solution intéressante. Elle permet d'assurer une continuité d'usage en combinant la recharge électrique et le ravitaillement en hydrogène, ce qui atténue les effets de la rareté actuelle des infrastructures dédiées. Dans ce contexte, la présente recherche souligne que la notion de performance ne se réduit pas aux seules émissions à l'échappement. Les conditions

[18] Le titre complet du projet (en anglais) est: "*From the performance of a technological innovation in terms of combustion to the territorial governance of energy: what are the challenges for a direct injection internal combustion engine powered by hydrogen?*".

territoriales, les capacités administratives et budgétaires des collectivités, ainsi que la morphologie urbaine, influencent directement les trajectoires d'émissions et la faisabilité des politiques de mobilité propre. La forme urbaine — densité, consommation d'espace, organisation spatiale des activités — peut peser autant, voire davantage, que certaines variables technologiques dans la détermination de l'empreinte carbone.

Le présent article a pour objectif d'identifier les leviers et les verrous du déploiement, à l'échelle des villes et des territoires, d'une solution hydrogène fondée sur une motorisation hybride rechargeable associant un moteur à combustion interne hydrogène et la mobilité électrique. Cet objectif conduit à articuler trois niveaux d'analyse. Premièrement, la combustion de l'hydrogène, la maîtrise des émissions de NOx, ainsi que l'injection et le stockage embarqué, sont traités pour mesurer la performance technologique du moteur proposé. Deuxièmement, les conditions de performance d'usage sont analysées au regard notamment des besoins en matière d'autonomie, du coût de la technologie et des contraintes de compatibilité avec les infrastructures de transport. Troisièmement, notre attention porte sur les conditions territoriales et institutionnelles du déploiement par référence aux enjeux de gouvernance multiniveaux, à la hiérarchie administrative au sein des différentes villes, ainsi qu'à leurs capacités financières locales. Cette dernière dimension souligne l'importance et le rôle des processus politiques dans les dynamiques d'innovation et de diffusion des technologies vertes.

Cet article propose un cadre intégré d'évaluation du déploiement de l'hydrogène, articulant trois dimensions de la performance :

La *performance technique* porte sur la maîtrise de la combustion, la formation des NOx et le stockage embarqué ; elle constitue une condition nécessaire, non suffisante.

La *performance d'usage* désigne la capacité de la solution à produire le service attendu dans les conditions réelles d'exploitation — autonomie utile, coût complet, compatibilité infrastructurelle et réglementaire.

La *performance territoriale* renvoie à la capacité des collectivités à déployer cette solution, compte tenu de leurs ressources budgétaires, de leur position dans la hiérarchie administrative et de leur morphologie urbaine.

L'hypothèse défendue ici est que ces trois dimensions sont étroitement liées : un gain de performance technique ne produit d'effet environnemental que s'il est relayé par les deux autres. L'article établit ce lien à partir du projet NESMO et en tire une grille de lecture transposable à d'autres innovations énergétiques territorialisées. Après avoir explicité le cadre d'analyse (section 2) et la méthode (section 3), il présente les résultats techniques et d'usage (section 4), puis les verrous et leviers territoriaux identifiés dans le contexte francilien (section 5) ; la discussion (section 6) en tire des recommandations de gouvernance visant à synchroniser innovation technologique, infrastructures et stratégies territoriales.

1. Cadre d'analyse : performance et déploiement sociotechnique multi-échelles

Dans le cadre de cette recherche, une grille de lecture est proposée pour comprendre et mettre en œuvre les mécanismes d'émergence et de développement de l'innovation en fonction des spécificités des territoires. L'innovation résulte de l'appropriation, de l'exploitation et de la diffusion d'une idée ou d'une invention par des individus ou des groupes au sein d'un contexte socio-économique donné. Cette définition permet d'élargir la notion d'innovation

aux domaines du social, de l'organisation et des procédés. La référence à ces différents domaines contribue à souligner l'interaction comme un élément fondamental des processus de créativité et d'innovation (DANG et al., 2025 ; FORAY, 2025 ; FREEMAN & LOUÇÃ, 2001).

De surcroît, la présente recherche traite de la nature et du rôle des politiques de développement régional et des institutions locales dans les transferts de connaissance entre les acteurs. À cet égard, le concept de « systèmes d'innovation » proposé par FREEMAN (1992, 1995, 2010) reste particulièrement intéressant, car il met l'accent sur la nature systémique de la création de connaissances : c'est dans l'interaction entre les différents acteurs que réside le succès de l'innovation. L'objectif est alors de relier le thème de l'innovation technologique à celui des politiques de développement régional, en tenant compte de la dynamique de l'organisation territoriale et de l'articulation entre les différents niveaux de gouvernance (SCHEMBRI, 2024). Quant à la notion de territoire, elle demeure indissociable de celle d'espace d'interactions, lequel est constitué de ressources endogènes, d'infrastructures et de projets. Dans ce cadre, un territoire est innovant lorsqu'il développe, active et intègre une ou plusieurs innovations avec les différents acteurs du territoire (DANG et al., 2025 ; LOILIER, 2010). Sur un plan méthodologique, notre recherche met en avant l'interdisciplinarité, articulée autour du concept de *performance,* lequel est interrogé selon deux angles. D'une part, celui des sciences de la combustion renvoie à la performance en lien avec la mesure de l'impact environnemental des activités économiques à des échelles de plus en plus fines. D'autre part, celui des sciences humaines et sociales a trait à la performance de la gouvernance territoriale de l'énergie pour atteindre la neutralité carbone tout en garantissant l'accès à l'énergie au plus grand nombre.

1.1 Une conception élargie de la performance

La réduction des émissions de CO_2 issues des différents modes de transport est incontournable pour limiter le réchauffement climatique, préserver l'environnement et répondre aux grands enjeux de la transition énergétique. Au niveau européen, le règlement (UE) 2019/631 imposait une réduction de 37,5 % des émissions moyennes de CO_2 des voitures particulières neuves à l'horizon 2030 par rapport à 2021 ; le règlement (UE) 2023/851 a porté cette cible à 55 % en 2030 et à 100 % en 2035, tout en autorisant une exception pour les véhicules fonctionnant exclusivement aux carburants de synthèse – e-fuels (Union Européenne, 2019, 2023). En France, la loi d'orientation sur les mobilités de 2019 fixe à l'horizon 2040 la fin de la vente des voitures neuves utilisant des énergies fossiles. Cette loi s'inscrit dans la trajectoire de neutralité carbone du secteur à l'horizon 2050 (ministère de la Transition écologique et solidaire, 2017). L'ensemble de ces objectifs provoque des ruptures technologiques sans précédent dans le secteur automobile. Dans ce contexte, les véhicules à énergie alternative doivent être déployés massivement pour atteindre ces cibles : véhicules électriques à batterie (BEV), véhicules hybrides (HEV), véhicules hybrides rechargeables (PHEV) et véhicules à pile à combustible (FCEV).

Les analyses de cycle de vie disponibles montrent que le classement comparatif de ces motorisations dépend fortement des hypothèses retenues : contenu carbone de l'électricité de recharge, kilométrage annuel, taux effectif d'usage en mode électrique, durée de vie et filière de production des batteries. Dans les configurations où l'usage de l'électricité est élevé et le mélange de recharge peu carboné, le véhicule hybride rechargeable présente un bilan compétitif au regard tant du véhicule thermique que du véhicule électrique à batterie de forte

capacité ; dans les configurations opposées, il en est tout autrement. C'est donc moins une supériorité intrinsèque que la robustesse de cette architecture aux conditions réelles d'usage qui justifie ici son examen. Par ailleurs, le processus de combustion doit être optimisé afin d'assurer la conformité avec des normes d'émissions de plus en plus strictes. Dans ce contexte, l'utilisation de vecteurs énergétiques comme l'hydrogène permet de réduire les émissions polluantes telles que les NOx en sortie du moteur.

À ce titre, la présente recherche repose sur une conception élargie de la performance, qui dépasse la seule efficacité énergétique ou la réduction des émissions à l'échappement. Si la dimension technologique demeure centrale — notamment à travers la maîtrise de la combustion de l'hydrogène, la réduction des émissions de NOx et l'optimisation de l'architecture hybride rechargeable — elle ne constitue qu'un premier niveau d'analyse. La performance doit être entendue comme un construit multidimensionnel, intégrant à la fois l'efficacité technologique, la pertinence d'usage et la capacité d'intégration territoriale. Par conséquent, l'évaluation d'une solution hydrogène ne saurait être dissociée des contextes institutionnels et urbains dans lesquels elle s'inscrit. La performance dépend aussi de facteurs institutionnels tels que la morphologie urbaine, les choix en matière d'aménagement et l'organisation des mobilités. En outre, ces facteurs conditionnent indirectement les niveaux d'émissions, indépendamment des seules caractéristiques technologiques du véhicule.

Dans cette perspective, la performance d'une motorisation hydrogène hybride rechargeable se mesure non pas uniquement en laboratoire, mais aussi dans sa capacité à fonctionner de manière cohérente avec un environnement urbain donné. La disponibilité des infrastructures, la compatibilité avec les zones à faibles émissions, l'autonomie effective et le coût global d'usage deviennent des variables structurantes. La notion de « performance d'usage » renvoie précisément à cette articulation entre l'innovation technologique et les conditions institutionnelles de son appropriation.

Nous définissons la *performance d'usage* comme la capacité d'une solution technologique à produire, dans les conditions réelles d'exploitation d'un territoire donné, le service attendu par ses utilisateurs, à un coût et selon des modalités qu'ils jugent acceptables. Cette notion se distingue de la performance technique en ce qu'elle est relationnelle : elle est une propriété non pas de l'artefact, mais du couple formé par l'artefact et son environnement d'usage. Une même motorisation est performante à l'usage dans un territoire doté d'une station de ravitaillement et d'une flotte captive, et ne l'est pas dans un territoire qui en est dépourvu.

Quatre dimensions la rendent observable :

(i) La *continuité de service* : l'autonomie utile, la durée et la disponibilité du ravitaillement, la part des trajets types couverts sans rupture de charge.
(ii) Le *coût complet d'usage* : coût total de possession rapporté au kilomètre, incluant l'acquisition, l'énergie consommée, la maintenance et la valeur résiduelle.
(iii) La *réglementation et les infrastructures* : l'accès aux zones à faibles émissions, la densité et l'accessibilité du réseau de stations, l'adaptation des dépôts et des ateliers.
(iv) L'*inscription territoriale* : l'adéquation aux profils de déplacement et à la morphologie urbaine des territoires considérés.

Cette décomposition constitue le cœur analytique de l'article. Les deux premières dimensions sont renseignées par les résultats de la modélisation de la combustion et par l'architecture

hybride rechargeable (section 4) ; les deux dernières le sont par les entretiens et les indicateurs territoriaux (section 5). C'est par elle que les trois dimensions de la performance demeurent étroitement liées, la performance d'usage faisant le lien entre ce que la technologie permet et ce que le territoire rend possible.

1.2. L'hydrogène comme un objet sociotechnique

L'analyse proposée s'inscrit dans une approche sociotechnique des transitions énergétiques, dans laquelle l'innovation est appréhendée comme le résultat d'interactions entre les dynamiques technologiques, les structures institutionnelles et les contextes territoriaux (GEELS, 2012). Dans le cadre de cette méthodologie, la référence au développement soutenable renvoie au courant du *Sustainability Transitions Research Network* (STRN), qui structure depuis une quinzaine d'années un programme de recherche interdisciplinaire sur les dynamiques de transition socio-technique vers la soutenabilité (KÖHLER *et al.*, 2019). Cette approche s'appuie notamment sur le modèle de transition proposé par GEELS & SCHOT (2007), lequel distingue plusieurs trajectoires d'évolution des systèmes sociotechniques, (transformation, substitution, reconfiguration, désalignement/ré-alignement). Ces travaux s'inscrivent dans une vision holiste et intégrative des changements socio-écologiques, selon laquelle les dimensions technologiques, institutionnelles, culturelles et comportementales interagissent dans un processus co-évolutif de long terme (GEELS, 2019). Ils partagent une conception commune de la complexité des transitions sociétales, où la connaissance doit dépasser les frontières disciplinaires pour permettre une compréhension approfondie, co-construite avec différentes parties prenantes, des processus de transformation. Notre approche centrée sur l'intégration des disciplines, la collaboration et la synthèse, renforce la nécessité d'une approche réflexive et systémique de la notion de transition et des processus dynamiques impliquant différentes interactions entre les innovations technologiques, les changements sociétaux, les institutions et le contexte socio-économique. À cet égard, le modèle multi-échelles proposé par GEELS & SCHOT (2007), s'inscrit pleinement dans cette logique. Dans ce modèle, les transitions résultent de l'interaction entre trois échelles : les niches d'innovation, les régimes socio-économiques et le contexte macroéconomique. Cette approche formalise le processus d'articulation des enjeux, des acteurs et des règles institutionnelles dans un cadre dynamique qui permet d'appréhender la complexité inhérente aux transitions. À cet égard, l'interdisciplinarité proposée dans cette recherche favorise la co-construction des connaissances entre les différentes parties prenantes. De surcroît, le modèle multi-échelles permet d'articuler plusieurs concepts autour de la notion de trajectoire (*Pathway*). Des concepts issus de l'économie de l'innovation par référence aux incitations et l'allocation des ressources, de la science de la combustion en lien notamment avec la performance traitée dans ses dimensions technique et environnementale, et des sciences politiques sur le thème de la gouvernance.

Dans cette perspective, le déploiement d'une solution hydrogène dépend non pas uniquement de ses performances techniques, mais également de la structuration des « niches » d'innovation et des conditions de leur diffusion dans les systèmes socio-économiques existants. Le moteur thermique à hydrogène étudié dans le cadre de NESMO apparaît alors comme un objet sociotechnique au sens où son développement et sa diffusion dépendent d'interactions étroites entre l'ingénierie, la régulation, les infrastructures et les acteurs publics. Sur un plan technologique, la solution de motorisation est confrontée à plusieurs verrous : la rapidité de combustion de l'hydrogène, les risques de pré-allumage ou de retour de flamme, la gestion des pics de pression et les émissions de NOx consécutives aux hautes températures.

Par ailleurs, les contraintes de stockage à haute pression ou en phase liquéfiée de l'hydrogène ne sauraient être écartées. Ces défis techniques appellent des solutions d'ingénierie spécifiques, telles que l'injection directe, le mélange pauvre ou l'hybridation intelligente. Par ailleurs, ces innovations ne prennent sens qu'à l'intérieur d'un écosystème territorial cohérent. L'hydrogène nécessite des infrastructures dédiées, notamment des stations de ravitaillement, dont la rareté actuelle constitue un verrou majeur au déploiement à grande échelle. À cet égard, l'Île-de-France ne dispose encore que d'un nombre limité de stations, ce qui rend toute diffusion massive prématurée sans stratégie coordonnée d'investissement. L'architecture hybride rechargeable proposée répond en partie à cette contrainte. En combinant un moteur hydrogène et une batterie électrique, elle permet de sécuriser l'usage même en l'absence d'un réseau dense de stations. Ce choix traduit ainsi une réponse sociotechnique à un verrou territorial identifié : l'innovation doit être conçue en interaction avec les contraintes imposées par l'infrastructure existante. L'objet technologique devient alors indissociable des politiques publiques et des capacités d'investissement.

1.3. Une approche multi-échelles du déploiement

La transition énergétique actuelle représente un enjeu majeur de la gouvernance territoriale de l'énergie. En effet, le caractère diffus de ces nouvelles sources d'énergie révèle des potentiels énergétiques à des échelles bien plus locales, contribuant en cela à considérer sous un angle nouveau la décentralisation, la gouvernance multiniveaux et les questions de souveraineté. Dans le contexte d'une transition énergétique qui transforme le secteur dans lequel elle s'insère, la gouvernance territoriale implique une reconfiguration des relations entre les acteurs locaux, les ressources énergétiques et les modèles de production-consommation. Il est donc important d'analyser les mécanismes de coordination et de décision qui accompagnent les initiatives locales. Dans ce registre, la présente recherche fait écho à l'hypothèse de EVRARD (2014), selon laquelle la transition énergétique apparaît comme une véritable *alternative de politique publique* structurée autour de représentations partagées, d'arrangements institutionnels et de configurations d'acteurs spécifiques qui impulsent de nouvelles dynamiques de décentralisation et d'évolution des usages. À ce titre, les nouvelles formes d'organisation du secteur énergétique s'inscrivent dans des systèmes à intégration horizontale et territorialisée qui valorisent les potentiels locaux et les écosystèmes territoriaux d'innovation (SCHEMBRI, 2024).

De surcroît, l'analyse proposée met en évidence le rôle important des échelles administratives et territoriales dans la structuration des trajectoires énergétiques. Le déploiement d'une solution hydrogène dépend de la gouvernance multiniveaux de l'énergie, partant de l'échelon européen pour aboutir à celui de la commune, ainsi que des arbitrages budgétaires et des priorités déclinées à chaque échelon de la décision politique. Cela nous amène également à questionner « l'intelligence » des villes au regard de la manière dont ces dernières peuvent exploiter les informations tirées de ces nouvelles formes d'organisation du secteur énergétique. Le concept de « ville intelligente » demeure encore controversé car il renvoie à différentes interprétations de ces villes durables et de leurs impacts potentiels sur l'environnement et le développement humain. Toutefois, les recherches menées sur l'intelligence des villes et la durabilité nous permettent de mieux comprendre le positionnement des acteurs (par référence à la puissance publique, aux usagers et aux acteurs privés) dans la construction de la ville durable de demain. Cette recherche contribue à la littérature qui traite de la performance des politiques territoriales (GLAESER & GOTTLIEB, 2008 ; KLINE & MORETTI, 2014a ; LU et al., 2019 ; NEUMARK & KOLKO, 2010 ;

NEUMARK & SIMPSON, 2015). Elle propose une contextualisation centrée sur le régime climatique et les politiques qui lui sont associées. Par ailleurs, contrairement aux études communément rencontrées qui mettent en évidence les effets globaux des politiques territoriales sur une région donnée (NEUMARK & SIMPSON, 2015 ; LU *et al.*, 2019), la présente recherche se concentre sur les effets hétérogènes des politiques territoriales au sein même d'une région. Au demeurant, elle s'inscrit dans la littérature concernant la primauté urbaine en lien avec les institutions politiques (BO & CHENG, 2021). Nombre d'études constatent que, parmi les différences entre les villes, la primauté urbaine, c'est-à-dire la dominance d'une ville dans un groupe, demeure particulièrement significative. Même si la hiérarchie politique apparaît comme un moteur essentiel de la primauté urbaine (CHEN et al., 2017 ; BO & CHENG, 2021), il existe des forces structurelles dans le système politique qui déterminent les choix politiques. L'originalité de la recherche proposée réside ici dans la manière dont la primauté urbaine interroge « l'intelligence » que les villes souhaitent porter de manière à atteindre la durabilité sur un territoire.

À cette fin, des modèles de planification urbaine peuvent être mis en place par les villes afin de tracer leur futur ; les Plans Climat-Air-Energie Territoriaux (PCAET) s'inscrivent dans cette perspective. Dans la littérature, divers modèles de planification urbaine fondés sur l'énergie (en termes de conversion et de gestion) ont été proposés (ANTROBUS, 2011 ; BIBRI & KROGSTIE, 2017 ; CALVILLO et al., 2016 ; DE JONG et al., 2015 ; HAARSTAD & WATHNE, 2019 ; MARCH & RIBERA-FUMAZ, 2016 ; YIGITCANLAR & KAMRUZZAMAN, 2018). Par ailleurs, il existe une littérature récente qui traite de la possibilité de procéder à un couplage sectoriel entre l'énergie et les transports à l'échelle d'une ville, en sollicitant les technologies associées à l'hydrogène décarboné et en identifiant les diverses formes de planification urbaine (BALTA & BALTa, 2022 ; CAPURSO et al., 2022 ; FUSE et al., 2021 ; MOSTAFAEIPOUR et al., 2020 ; NAM et al., 2021 ; REZAEI et al., 2020).

Enfin, la planification répond pleinement aux enjeux en matière de logistique et de souveraineté urbaines qui demeurent très peu abordés dans la littérature. La logistique urbaine a trait aux conditions de transport des marchandises qui entrent et circulent en ville. Quant à la *souveraineté urbaine*, elle concerne les conditions d'approvisionnement en produits énergétiques des villes. Dans les deux cas, les questions relatives à la maîtrise et à la transformation des flux (de marchandises et d'énergie) sont essentielles ; elles nécessitent une optimisation conjointe des modalités de gouvernance territoriale et des systèmes d'information.

L'approche retenue dans le présent article repose ainsi sur une lecture multidimensionnelle du déploiement : la dimension du véhicule et de la technologie, celle de la flotte ou de l'usage captif pour le déploiement, celle politico-administrative qui recense les différents niveaux de la décision politique. C'est à l'intersection de ces dimensions que se situent les verrous et les leviers susceptibles d'accélérer ou de freiner la diffusion de la solution hydrogène proposée.

Méthode et résultats

1.1. Une démarche interdisciplinaire structurée autour du projet NESMO

Le présent article repose sur une collaboration interdisciplinaire associant les sciences de la nature et l'ingénierie, ainsi que les sciences humaines et sociales. La méthodologie adoptée procède donc non pas d'une juxtaposition de disciplines, mais d'une intégration active des

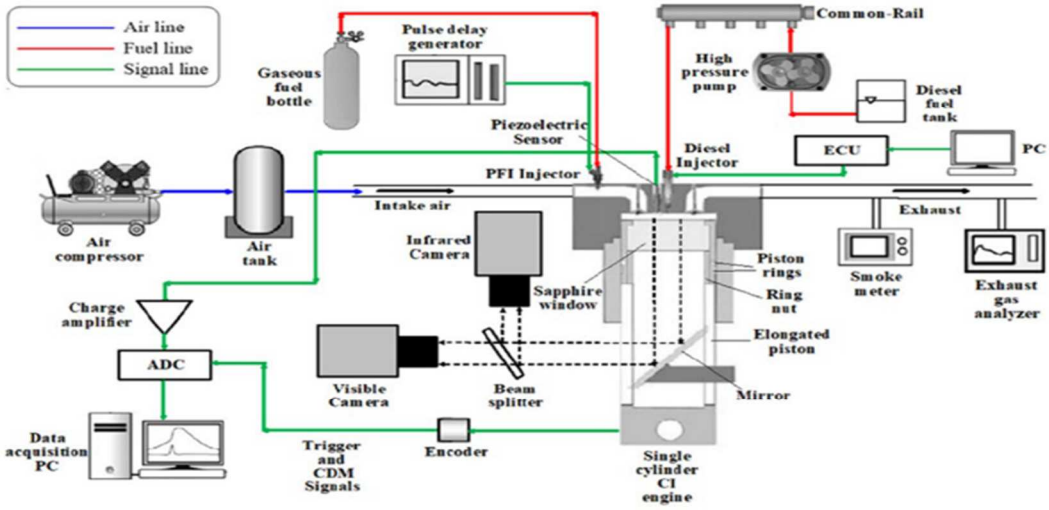
approches. Les résultats issus des sciences humaines et sociales peuvent orienter le choix des technologies, tandis que la compréhension fine des contraintes d'ordre technique permet de construire des politiques publiques plus efficaces pour le déploiement. Cette articulation supposée entre les dimensions technique et institutionnelle fait pleinement écho aux approches interdisciplinaires de l'analyse des systèmes énergétiques (SOVACOOL, 2014). Par ailleurs, la méthodologie proposée s'appuie sur le développement durable sollicité ici en tant que « méthode », plutôt qu'en tant « qu'objet de recherche » (RADJA, SCHEMBRI & BAZIN, 2016 ; SCHEMBRI & RADJA, 2015 ; NICOLAS, RADJA & SCHEMBRI, 2009). La durabilité est abordée comme une démarche heuristique qui permet d'orienter la recherche plutôt que d'en prédire le résultat (NORGAARD, 1994 ; 2005 ; LELE & NORGAARD, 2005). Cette démarche permet de saisir les interactions complexes entre les différentes dimensions de la réalité, avec une attention portée sur les boucles de rétroaction et les effets d'émergence qui échappent aux analyses disciplinaires traditionnelles.

1.2. Le regard du combustionniste : une modélisation de la combustion hydrogène

L'intérêt pour l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne remonte aux années soixante, pour ses propriétés qui le distinguent des carburants fossiles — la température d'auto-inflammation, l'énergie d'activation, la vitesse de flamme — et les premières études sur la modélisation des moteurs à hydrogène (H_2ICE) se développent durant les deux décennies suivantes (FAGELSON et al., 1978 ; EICHLSEDER et al., 2003 ; RANA et al., 2015).

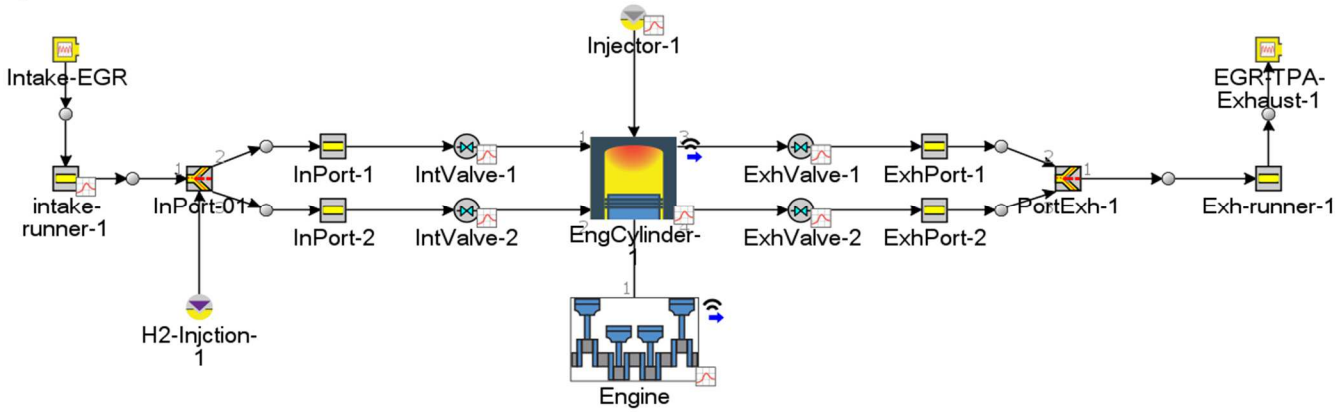
Le volet technique du projet NESMO repose sur un couplage entre les essais expérimentaux et la modélisation numérique. Il est traité en collaboration avec l'Istituto Motori (STEMS-CNR, Naples). Il a fait l'objet d'une première publication dans MAROTEAUX et al. (2024). Le dispositif expérimental est un moteur monocylindre de recherche à accès optique, à allumage par compression, monté sous la culasse d'un moteur de série à quatre cylindres conforme à la norme Euro 5 : alésage de 85 mm, course de 92 mm, cylindrée unitaire de 522 cm³, taux de compression de 16,5 : 1. L'hydrogène est injecté au collecteur d'admission par un injecteur dédié aux gaz, tandis qu'un appoint de gazole est injecté directement dans le cylindre pour assurer l'allumage de la charge pré-mélangée ; l'hydrogène seul ne s'enflammant pas de façon contrôlée dans ces conditions. Le fonctionnement repose donc sur une bicarburation à fort taux de pré-mélange : l'hydrogène représente de 88 à 90 % de l'apport énergétique.

Figure 1 — Dispositif expérimental : moteur monocylindre à accès optique



Source : projet NESMO, d'après MAROTEAUX et al. (2024).

Figure 2 — Modèle du banc moteur simulé sous GT-SUITE



Source : projet NESMO. L'hydrogène est introduit au collecteur d'admission (H2-Injection), le gazole directement dans le cylindre (Injector), la boucle d'EGR reliant l'échappement à l'admission.

La modélisation est conduite sous GT-SUITE en 0D/1D. Le banc est reproduit sous forme de moteur numérique et la combustion est décrite par un modèle prédictif à double carburant, qui associe un modèle de combustion par diffusion pour le gazole à un modèle de propagation de flamme à deux zones pour l'hydrogène pré-mélangé, la vitesse de flamme laminaire de l'hydrogène étant estimée par un réseau de neurones entraîné sur des simulations cinétiques détaillées.

Quatre points de fonctionnement ont été retenus, à 1 500 et 2 000 tr/min, avec et sans recirculation des gaz d'échappement (18 à 19 %). Ils correspondent à des mélanges très pauvres, la richesse restant inférieure à 0,3, ce qui place la combustion dans le régime dilué à basse température visé par le projet.

La calibration se fait en deux temps : une analyse à trois pressions cale d'abord le remplissage du cylindre et restitue le taux de combustion, puis une optimisation par moindres carrés ajuste sept multiplicateurs du modèle de combustion. Une difficulté mérite d'être signalée : une calibration unique valable sur l'ensemble du domaine n'a pas pu être obtenue et deux jeux de constantes distincts ont dû être retenus selon la présence ou non d'EGR — limite déjà documentée dans la littérature sur les modèles prédictifs à double carburant.

Le modèle reproduit fidèlement les délais d'allumage, les pics de pression cylindre et les émissions de NOx, mais sous-estime la pression moyenne indiquée d'environ 10 %, écart attribué à la vitesse de flamme laminaire de l'hydrogène pendant la détente. Les niveaux d'émissions confirment l'intérêt de la solution : aucune émission de monoxyde de carbone, un CO_2 inférieur à 1 % — imputable au seul appoint de gazole — et des NOx de 62,9 ppm sans EGR, ramenés à 24,6 ppm avec EGR à 1 500 tr/min, soit une réduction de 61 %.

Une étude paramétrique a ensuite exploré la répartition du gazole entre l'injection pilote et l'injection principale, à quantité d'hydrogène constante (Tableau 1). Elle établit que la réduction de l'injection principale n'affecte ni le début ni la durée de la combustion, ce qui autorise le passage à une injection unique et une baisse de 12 % du gazole embarqué. Toutefois, l'augmentation de la masse du pilote double les émissions de NOx, même si elle améliore la pression moyenne indiquée : à 1 500 tr/min et sans EGR, celles-ci passent de 62,9 ppm au cas de référence à 129,6 ppm lorsque le gazole est concentré sur la seule injection pilote (Figure 3).

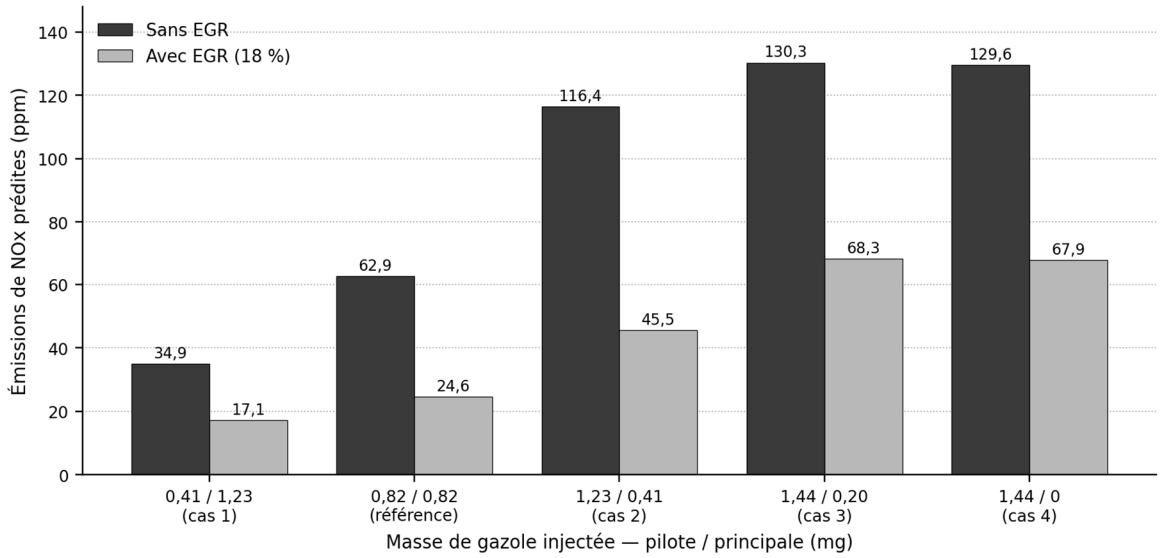
C'est le premier des arbitrages que cet article entend documenter : le gain environnemental n'est pas donné par la technologie, il résulte d'un réglage entre performance et émissions.

Tableau 1 — Répartition du gazole entre injections et pression moyenne indiquée à 1 500 tr/min

Configuration	Masse pilote / principale (mg)	Total gazole (mg)	IMEP sans EGR (bar)	IMEP avec EGR (bar)
Référence	0,82 / 0,82	1,64	4,35	3,25
Cas 1	0,41 / 1,23	1,64	3,89	2,99
Cas 2	1,23 / 0,41	1,64	4,58	3,37
Cas 3	1,44 / 0,20	1,64	4,70	3,45
Cas 4 (injection unique)	1,44 / 0	1,44	4,67	3,41
Mesure expérimentale	0,82 / 0,82	1,64	4,80	3,67

Source : d'après MAROTEAUX et al. (2024), tableaux 7 et 8. La quantité d'hydrogène est maintenue constante ; le début d'injection pilote est fixé.

Figure 3 — Émissions de NOx prédites selon la répartition du gazole, à 1 500 tr/min



Source : calculs des auteurs à partir des simulations du projet NESMO (MAROTEAUX et al., 2024). La quantité d'hydrogène est maintenue constante et le début d'injection pilote est fixé.

Trois limites encadrent ces résultats. Tout d'abord, les points de calibration et de validation sont les mêmes, faute de données expérimentales suffisantes sur l'hydrogène pour constituer un jeu indépendant. Par ailleurs, le domaine exploré demeure étroit : deux régimes, une charge, un monocylindre de recherche dont les niveaux de pression ne se transposent pas directement à un moteur complet. Enfin, les émissions de protoxyde d'azote, dont le pouvoir de réchauffement est environ trois cents fois celui du CO_2, n'ont été ni mesurées ni simulées

et devront l'être avant toute conclusion quant à la performance environnementale de la solution.

Au demeurant, une précision quant au périmètre s'impose. Le banc d'essai valide le comportement de combustion de la solution en bicarburation au niveau du groupe motopropulseur ; il ne porte pas sur l'architecture véhicule. Le choix d'une architecture hybride rechargeable relève, dans cet article, de la performance d'usage et de l'ancrage territoriale de la solution. Ces aspects sont développés dans les sections 4 et 5 de l'article à partir des entretiens et des indicateurs territoriaux.

1.3. Le regard du politologue : une analyse de la gouvernance territoriale

Le second volet méthodologique porte sur l'analyse de la gouvernance multiniveaux de l'énergie en Île-de-France, avec une attention portée sur le plateau de Saclay. Trois objectifs structurent cette analyse :

- Comprendre comment les politiques énergétiques et de transport propre sont sélectionnées et mises en œuvre selon les structures administratives et l'accès aux ressources ;
- Analyser la collaboration entre les différents échelons territoriaux ;
- Identifier les outils politiques les plus adaptés à l'introduction d'une nouvelle technologie telle que les moteurs thermiques à hydrogène.

Au sein du projet NESMO, le regard du politologue s'est concentré sur l'évaluation de la perception des véhicules à hydrogène par les décideurs politiques et l'identification des obstacles et des perspectives pour leur déploiement par les villes et les territoires comme partie intégrante de leur parc automobile. Le projet NESMO a associé la modélisation technique d'un nouveau type de moteur à hydrogène à la compréhension, par le politologue, du fonctionnement des politiques locales dans le contexte de la gouvernance énergétique multiniveaux au sein de la région Île-de-France. De façon générale, la gouvernance multiniveaux en France demeure bureaucratique et complexe. Cela s'explique par le chevauchement de nombreux échelons territoriaux de gouvernance, chacun doté de compétences politiques spécifiques en vertu du droit français ; cela contraste avec les systèmes fédéraux d'autres pays, notamment les États-Unis (BARICHELLA, 2023). De bas en haut, les principaux échelons du modèle français comprennent, sans s'y limiter[19] : les communes, les intercommunalités (des groupements de communes travaillant ensemble), les départements dont l'origine remonte à Napoléon (AUBELLE & KADA, 2019), les régions (18 au total après les dernières réformes[20]) et l'État (AUBELLE & KERROUCHE, 2021 ; VITAL-DURAND, 2017 ; VERPEAUX, 2020 ; FAURE, 2021).

La recherche a porté sur la gouvernance locale en Île-de-France, en se concentrant sur le plateau de Saclay, situé au nord de l'Essonne et au sud-est des Yvelines, deux départements riches en diversité territoriale. L'objectif a été de déterminer :

[19] L'Union européenne (UE) peut être considérée comme constituant l'échelon le plus élevé de la pyramide multiniveaux, puisque le droit de l'UE est contraignant, avec une primauté sur le droit national dans la plupart des cas.

[20] Cela comprend treize régions de France métropolitaine et cinq régions d'outre-mer. Voir : XIVe Législature de la Cinquième République française (2012-2017). *LOI n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République*.

(i)Comment les politiques énergétiques sont sélectionnées et mises en œuvre en fonction des variations dans les structures/hiérarchies administratives et de l'accès aux ressources ;

(ii)Comment différentes structures administratives et budgétaires peuvent collaborer pour influencer les meilleures pratiques à l'échelle locale ;

(iii) Quels sont les outils politiques optimaux pour la mise en œuvre d'une nouvelle technologie, telle que les moteurs thermiques à hydrogène, dans les villes et les territoires de l'échantillon, en tenant compte des différences en termes de capacités et de ressources administratives.

Les vingt communes et les six intercommunalités retenues sont également représentatives des différents types de structures/hiérarchies administratives au sein de la région Île-de-France. La capitale, Paris, a servi de point de comparaison avec les autres communes et territoires de l'échantillon, compte tenu de son engagement affiché en faveur d'un système de transport diversifié et neutre en carbone[21]. Une attention particulière a été portée sur la capacité des territoires à travailler avec des unités administratives plus petites pour mutualiser les infrastructures et les capacités de stockage d'hydrogène dans la formation d'écosystèmes collaboratifs, ainsi qu'à l'inclusion de territoires moins ambitieux en matière climatique au sein de ces réseaux afin d'encourager un engagement plus actif en faveur de solutions de transport propres et innovantes.

L'échantillon de collectivités[22] étudiées a été sélectionné en fonction de plusieurs critères tels que la taille de la population, la capacité budgétaire[23], l'affiliation politique et le degré d'engagement en faveur de solutions de transport neutres en carbone. Cette sélection a permis de comparer des configurations institutionnelles contrastées, allant de grandes villes

[21] Voir BARICHELLA (2023), Chapitre VIII.

[22] Dans l'échantillon, nous avons dix-huit communes localisées en grande couronne, (les départements de l'Essonne et des Yvelines), et deux communes au sein de la petite couronne, (les départements des Hauts-de-Seine et du Val-de-Marne), auxquelles s'ajoute Paris, retenue comme point de comparaison. Par ailleurs, l'échantillon inclut également six intercommunalités : quatre communautés d'agglomération de grande couronne (Paris-Saclay, Versailles Grand Parc, Saint-Quentin-en-Yvelines, Pays de Limours) et deux établissements publics territoriaux de la Métropole du Grand Paris (Grand-Orly Seine Bièvre, Grand Paris Seine Ouest).

[23] La capacité budgétaire a été mesurée en sollicitant plusieurs critères incluant :

- les recettes de fonctionnement qui représentent l'ensemble des recettes permettant aux communes d'assurer le bon fonctionnement des services locaux ;

- les charges de fonctionnement qui comprennent l'ensemble des coûts de fonctionnement. C'est via cette catégorie de dépenses que sont financés les taux d'intérêt, les frais de fonctionnement et les services locaux ;

- le résultat comptable représentant la différence entre les recettes et les charges de fonctionnement ;

- les ressources d'investissement comprenant les prêts, subventions, etc., qui constituent des recettes visant, d'une part, à financer les investissements et, d'autre part, à rembourser le capital issu des emprunts ;

- les charges d'investissement qui correspondent aux opérations en capital affectant un patrimoine local (rénovation d'équipements, acquisition de nouveaux bâtiments), ainsi qu'au remboursement des emprunts.

- la capacité d'autofinancement qui caractérise le potentiel de liquidité locale ;

- le fonds de roulement qui constitue la trésorerie résultant de la différence entre les financements (dotations, subventions, prêts) disponibles à plus d'un an et les actifs immobilisés ;

- et enfin l'encours de la dette, qui représente le montant des dettes envers les banques.

dotées de ressources importantes à des communes de plus petite taille disposant de marges d'action plus limitées.

1.4. Entretiens semi-structurés et analyse qualitative

Dans le cadre du projet NESMO, l'analyse qualitative des facteurs locaux de gouvernance territoriale a conduit à différents types d'activités de recherche appliqués à l'échantillon. Premièrement, cela a consisté en la collecte et l'analyse des principaux documents relatifs aux politiques énergétiques et de transport propres promulguées par les villes et les territoires de l'échantillon au cours des dix dernières années. Il s'agit notamment d'actes administratifs et exécutifs, de décisions des conseils territoriaux aux différents échelons, ainsi que de cadres stratégiques plus généraux et de documents d'urbanisme. Deuxièmement, la collecte des données a reposé sur l'organisation de quinze entretiens de type semi-structuré avec dix-sept décideurs politiques et administrateurs de l'échantillon. Les entretiens ont été préparés et conduits en utilisant un socle de questions communes, tout en s'adaptant au profil de chaque interlocuteur. Ces entretiens semi-structurés se sont basés sur la méthodologie de GEORGE et BENNETT (2005) pour recueillir des informations détaillées lors de la période de discussion ouverte en fin d'entretien. Ces derniers ont permis de recueillir des informations relatives aux processus de décision et de mise en œuvre des politiques énergétiques et de transport propres, aux capacités de coopération territoriale, aux ressources administratives et budgétaires disponibles, ainsi qu'aux indicateurs de performance mobilisés par les collectivités. De surcroît, une analyse comparative des documents de politiques publiques locaux et des entretiens a permis d'identifier des tendances et des schémas récurrents dans les discours et les pratiques. Une attention particulière a également été portée sur le vocabulaire mobilisé par les différents acteurs, afin de comprendre comment l'hydrogène est positionné dans les priorités territoriales (court, moyen ou long terme) et comment il est articulé par rapport aux autres solutions (électrification, biocarburants).

Les quinze entretiens de type semi-structuré, qui ont été réalisés auprès de dix-sept interlocuteurs dans le cadre du projet NESMO, se sont déroulés sur une période d'environ trois mois, du 11 septembre 2023 au 15 novembre 2023. En termes de catégories d'acteurs, l'objectif a été de diversifier l'échantillon en combinant des élus avec des personnes travaillant dans l'administration locale. Du côté des élus, cela inclut des maires, adjoints au maire et conseillers municipaux, présidents de communauté d'agglomération ou conseillers régionaux. Concernant les membres de l'administration, il y a notamment des chefs de projet, des directeurs ou responsables de secteur au sein des communes, des intercommunalités et de la région. L'objectif a été de comparer les différents points de vue entre élus et membres de l'administration, ainsi que les divergences et le niveau de synchronisation selon les différents échelons de gouvernance. Les entretiens ont tous duré entre 30 minutes et 1 heure, en se basant sur la méthode des entretiens de type semi-structuré (voir ci-dessus). Même s'il n'y a pas eu d'enregistrement, des notes très précises ont été prises, suivies par une retranscription écrite de l'intégralité des entretiens. La précision des informations fut assurée par le fait que la retranscription écrite a été réalisée immédiatement après chaque entretien, permettant ainsi d'éviter au maximum tout oubli ou malentendu. Dans certains cas, des échanges par courriel pour clarifier certains propos furent réalisés post-entretien. Les personnes interrogées ont accepté que leur nom figure dans la liste des entretiens (disponible après la bibliographie à la fin de l'article). Cependant, la plupart ont demandé une anonymisation concernant la retranscription d'extraits issus des entretiens ; c'est pour cette raison que les extraits cités dans les sections ci-dessous ne sont pas attribués.

Concernant la méthodologie et le regard du politologue, certaines limites peuvent être relevées. Tout d'abord, la portée des résultats dépend du périmètre francilien, du plateau de Saclay, et plus particulièrement de la sélection des communes. Même si de nombreuses tendances sont transposables à toute l'Île-de-France, à d'autres régions françaises voire même à d'autres pays en Europe et au-delà, certaines le sont moins en raison des particularités propres à chaque territoire. De plus, les résultats dépendent également de la disponibilité des données territoriales, y compris l'échantillon des entretiens et les réponses apportées par les personnes interrogées. Même si l'échantillon fut choisi de façon délibérément représentative, (voir ci-dessus), il est possible que certains points de vue aient été moins bien pris en compte.

Tableau 2 — Liste des personnes interviewées dans le cadre du projet NESMO

N°	Date de l'entretien	Nom et fonction des personnes interviewées
1	Lundi 11 septembre 2023	Mme Eva PIETRASZEWSKI, cheffe de projets aménagement et transports, direction de l'Aménagement durable et de l'urbanisme, ville d'Orsay
2	Mercredi 13 septembre 2023	M. Louis JOUVE, ancien conseiller au ministère de la Transition écologique, conseiller de quartier à la mairie du 6e arrondissement de Paris
3	Jeudi 14 septembre 2023	M. Hugo DEVILLERS, directeur Voirie et Mobilités, ville de Vélizy-Villacoublay
4	Jeudi 14 septembre 2023	Mme Sandrine GELOT, maire de la commune de Longjumeau
5	Lundi 18 septembre 2023	Mme Laurence RENARD, maire-adjointe déléguée à la politique de territoire durable, commune de Magny-les-Hameaux
6	Mardi 19 septembre 2023	Mme Nathalie BRAR-CHAUVEAU, adjointe au maire chargée du développement économique, des mobilités et de l'emploi, commune de Vélizy-Villacoublay
7	Mercredi 20 septembre 2023	M. Grégoire de LASTEYRIE, maire de Palaiseau, président de la communauté d'agglomération Paris-Saclay, conseiller régional délégué spécial aux mobilités durables de la région Île-de-France
8	Jeudi 21 septembre 2023	M. Jean-Baptiste PEGEON, représentant des écologistes au conseil d'administration d'Île-de-France Mobilités
9	Mercredi 27 septembre 2023	Mme Charlotte NENNER, conseillère régionale d'Île-de-France, groupe écologiste, membre de la commission transport du conseil régional
10	Vendredi 29 septembre 2023	M. Fabien GUÉROT, directeur de l'Environnement et de la Ville durable, commune de Meudon
11	Mardi 3 octobre 2023	M. Nicolas SAMSOEN, maire de Massy
12	Jeudi 5 octobre 2023	M. Roland ANEMIAN, responsable du service Nouveaux Usages à la mobilité, et M. Jonathan TROCMÉ, chargé de mission mobilités, communauté d'agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines
13	Mardi 10 octobre 2023	M. Clovis CASSAN, maire de la commune des Ulis
14	Lundi 16 octobre 2023	M. Justin LE BIHAN, chargé de mission mobilités et politique de transport, plan des mobilités en Île-de-France
15	Mercredi 15 novembre 2023	Mme Sonia BRAU, maire de la commune de Saint-Cyr-l'École, et M. Vladimir BOIRE, élu aux mobilités de la commune de Saint-Cyr-l'École

Source : entretiens conduits par A. BARICHELLA. Les personnes interrogées ont donné leur consentement à ce que leur nom figure dans cette liste ; la plupart ont toutefois souhaité conserver l'anonymat pour les extraits cités dans l'article.

1.5. Le regard de l'économiste : une analyse quantitative et des indicateurs territoriaux

Le troisième volet méthodologique porte sur la mesure : il vise à rapporter l'empreinte carbone des communes à leur morphologie urbaine et aux capacités d'action des collectivités qui les administrent. En complément de l'analyse qualitative, la recherche mobilise une modélisation de l'empreinte carbone des villes et de la morphologie urbaine, en s'appuyant sur le modèle IPAT formulé dans les années soixante-dix, puis élargi à la question climatique à travers l'identité dite de Kaya. Le modèle vise à décomposer cette empreinte en plusieurs forces ou facteurs explicatifs qui recensent les effets d'échelle, de composition et de qualité.

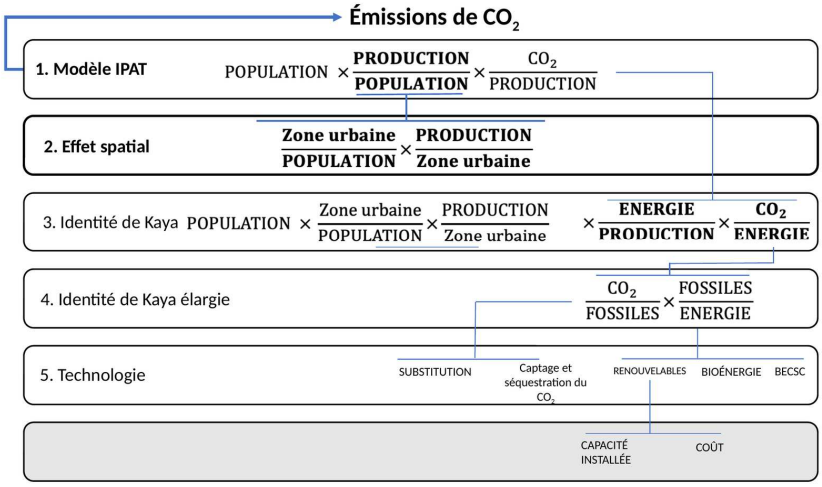
Ce modèle permet également d'identifier les leviers potentiels de la performance environnementale en intégrant des indicateurs liés à la morphologie urbaine. Tout d'abord, la densité de production prolonge les travaux fondateurs de GALLUP, SACHS & MELLINGER (1999), pour lesquels la *densité économique* (ou *GDP density*) correspond à la valeur du produit intérieur brut par unité de surface. Cet indicateur, défini comme le PIB (en parité de pouvoir d'achat) par kilomètre carré, permet d'évaluer l'efficacité productive de l'espace et rend compte de la concentration géographique des activités économiques (GALLUP, SACHS & MELLINGER, 1999 ; World Bank, 2009). Une densité plus élevée traduit une meilleure valorisation économique de l'espace urbain et s'associe souvent à des formes d'agglomération favorisant l'innovation et les rendements d'échelle.

Le second indicateur, la ***surface bâtie par habitant***, proposé par l'OCDE (OECD, 2018), mesure la consommation individuelle d'espace au sein des zones métropolitaines. Il constitue une mesure directe de l'étalement urbain et permet d'apprécier les formes d'urbanisation qui contribuent à la hausse des émissions liées à la mobilité et aux usages résidentiels. L'association de ces deux indicateurs offre une lecture intégrée de la relation entre structure spatiale, performance économique et empreinte environnementale des territoires urbains ; leur traduction en variables calculables sur les communes de l'échantillon est précisée plus bas.

Les mesures de densité proposées visent les politiques d'urbanisation et d'aménagement du territoire. La mesure qui a trait à l'intensité carbone de la production ou du revenu concerne principalement les leviers de la politique climatique ; il s'agit notamment de l'efficacité énergétique, de la maîtrise de la demande d'énergie et de la composition du mélange énergétique consommé. Ces différentes mesures peuvent contribuer à définir une démarche de territorialisation stratégique de l'action publique.

La Figure 4 récapitule cette décomposition : elle montre que la morphologie urbaine s'insère dans l'identité de Kaya comme un facteur au même titre que l'intensité énergétique ou le contenu carbone de l'énergie, et qu'elle constitue donc un levier d'action à part entière et non une simple variable de contexte.

Figure 4 — Du modèle IPAT à l'identité de Kaya élargie à la morphologie urbaine



Source : P. SCHEMBRI, d'après PETERS et al. (2017). Lecture : chaque ligne décompose la ligne précédente. L'effet spatial (ligne 2) introduit la morphologie urbaine dans l'identité de Kaya en décomposant le produit par habitant en une densité de consommation d'espace (zone urbaine par habitant) et une densité de production (production par unité de surface urbaine). BECSC : bioénergie avec captage et stockage du carbone.

L'analyse quantitative porte sur un échantillon de vingt-et-une communes franciliennes et de six intercommunalités, lequel est construit de manière à croiser les profils de morphologie urbaine et les échelons institutionnels : dix-huit communes de grande couronne, dans l'Essonne et les Yvelines, deux communes de la petite couronne et la ville de Paris, retenue comme point de comparaison en raison de sa densité atypique. Les données de population, de superficie et de densité proviennent du recensement de l'INSEE (2021) ; le revenu disponible total est issu du dispositif FiLoSoFi de l'INSEE pour la même année ; les émissions de gaz à effet de serre sont tirées de l'inventaire territorialisé du Citepa pour l'année 2021, diffusé par l'Observatoire des territoires, tous secteurs confondus et hors puits de carbone. Le périmètre retenu dépasse donc la seule mobilité et intègre le résidentiel, le tertiaire et l'industrie. C'est précisément cette vision d'ensemble qui permet de rapporter l'empreinte carbone à la forme urbaine. Le choix d'un millésime unique garantit la comparabilité entre les communes, au prix d'une photographie statique qu'il reviendra à des travaux ultérieurs de mettre en dynamique.

Ces catégories doivent être rendues mesurables à l'échelle communale, ce qui impose deux adaptations aux définitions rappelées ci-dessus.

Le produit intérieur brut n'étant pas disponible à ce niveau, la densité de production est calculée à partir du revenu disponible total ; et faute de données homogènes sur la surface bâtie, la consommation d'espace est rapportée à la superficie communale. Trois indicateurs en résultent :

La *densité de consommation d'espace* rapporte la superficie communale à la population et s'exprime en mètres carrés par habitant ; elle mesure l'emprise spatiale du mode de vie local.

La *densité de production* rapporte le revenu disponible total à cette même superficie et s'exprime en euros par mètre carré ; elle mesure l'intensité économique de l'espace.

Le produit de ces deux grandeurs restitue exactement le revenu disponible par habitant, ce qui assure la cohérence comptable de la décomposition présentée en Figure 4.

L'*intensité d'émissions*, enfin, rapporte les émissions territoriales au revenu disponible total et s'exprime en grammes de CO_2e par euro ; elle mesure le contenu en carbone de la richesse produite localement.

Une typologie en quatre profils a enfin été construite afin de croiser ces indicateurs morphologiques avec les capacités d'action des collectivités. Les communes sont réparties selon leur population — moins de 15 000 habitants, de 15 000 à 45 000, et 45 000 et plus —, Paris étant traitée séparément afin d'éviter qu'elle ne déforme les agrégats. Deux indicateurs budgétaires, construits à partir des comptes des collectivités, complètent la caractérisation : la capacité d'autofinancement et l'encours de la dette, l'une et l'autre rapportées aux produits de fonctionnement afin de neutraliser les effets de taille. Au demeurant, les valeurs présentées sont des médianes de groupe et non des moyennes. Pareil choix vise à limiter l'influence des valeurs extrêmes sur des effectifs réduits. Cette typologie fournit la grille de lecture mobilisée en section 5 pour rapprocher les profils d'émissions des marges d'action effectives des collectivités.

L'ensemble de ces matériaux d'ordre méthodologique— modélisation technique, entretiens, analyse documentaire, indicateurs territoriaux et analyse quantitative — fonde une approche multi-dimensionnelle du déploiement de la solution hydrogène. La méthode proposée permet ainsi d'articuler les niveaux technologique, institutionnel et spatial, afin d'identifier de manière structurée les verrous et les leviers qui conditionnent la diffusion de cette innovation dans les villes et les territoires étudiés.

3. Résultats : verrous et leviers techniques et de performance d'usage

3.1. Verrous liés à la dynamique de combustion hydrogène

L'un des premiers verrous identifiés concerne la dynamique spécifique de la combustion de l'hydrogène. La flamme issue de la combustion de l'hydrogène est caractérisée par une vitesse de propagation élevée, pouvant conduire à des pics de pression importants dans la chambre de combustion. Cette rapidité, si elle n'est pas maîtrisée, expose le moteur à des phénomènes de combustion anormale susceptibles d'affecter la fiabilité et la durabilité des composants. Par ailleurs, l'hydrogène présente une large plage d'inflammabilité et une énergie d'ignition faible, ce qui accroît les risques de pré-allumage et de retour de flamme, en particulier lorsque l'injection est mal calibrée ou que le mélange air-carburant est insuffisamment contrôlé. Ces caractéristiques imposent donc une adaptation fine de l'architecture du moteur[24], laquelle apparaît comme une condition préalable à toute industrialisation. Les propriétés spécifiques de la combustion de l'hydrogène – vitesse de flamme élevée, large plage d'inflammabilité et faible énergie d'ignition – sont bien documentées dans la littérature scientifique (VERHELST & WALLNER, 2009 ; WHITE et al., 2006). Les travaux de modélisation développés dans le cadre de NESMO, notamment autour de la combustion diluée à basse température, visent précisément à mieux comprendre et à contenir ces phénomènes. La maîtrise de la cinétique de combustion constitue ainsi non

[24] Par référence à la géométrie de la chambre de combustion, la stratégie d'allumage et le contrôle des températures.

seulement un verrou scientifique majeur, mais également un levier d'optimisation lorsque des stratégies adaptées sont mises en œuvre.

3.2. Émissions de NOx et arbitrages technico-environnementaux

Si la combustion de l'hydrogène n'émet pas de CO_2 à l'échappement, elle n'est pas exempte d'enjeux environnementaux. La présence d'azote dans l'air ambiant peut conduire, à haute température, à la formation d'oxydes d'azote (NO_x) dits « thermiques ». La formation d'oxydes d'azote à haute température constitue un enjeu central des moteurs à combustion hydrogène, malgré l'absence d'émissions de CO_2 (VERHELST & WALLNER, 2009). Ce phénomène constitue un point de vigilance majeur, notamment dans un contexte urbain où les polluants locaux font l'objet de régulations strictes. Des stratégies telles que le fonctionnement en mélange pauvre ou la recirculation des gaz d'échappement (EGR) peuvent contribuer à réduire la formation de NO_x. Toutefois, ces solutions impliquent des arbitrages potentiels sur la puissance spécifique ou sur la stabilité de la combustion. La recherche d'un compromis entre la performance énergétique, la puissance délivrée et la réduction des polluants locaux constitue donc un second verrou technique.

Les résultats issus du projet NESMO suggèrent que la combinaison d'outils de simulation, d'essais moteur et d'optimisation des paramètres d'injection permet d'identifier des configurations limitant les émissions tout en maintenant des niveaux de performance compatibles avec les usages visés. Ainsi, la réduction des NO_x apparaît-elle comme un défi technique structurant, dès lors qu'elle est intégrée en amont dès la conception du système.

3.3. Contraintes de stockage et intégration dans une architecture hybride

Un troisième verrou technique concerne le stockage embarqué de l'hydrogène. L'hydrogène doit être stocké soit à très haute pression (de l'ordre de 700bars), soit sous forme liquide à très basse température. Ces options impliquent des réservoirs renforcés, des systèmes de sécurité adaptés et une architecture d'alimentation spécifique. Dans le cas d'une motorisation hybride rechargeable, cette contrainte s'ajoute à la présence d'une batterie et d'un système électrique complet. L'intégration simultanée d'un réservoir haute pression, d'un moteur thermique adapté à l'hydrogène, d'un moteur électrique et d'un système de stockage électrochimique complexifie l'architecture globale du véhicule. La gestion des masses, des volumes et des dispositifs de sécurité constitue dès lors un enjeu central.

Toutefois, cette hybridation peut également représenter un levier. Le projet NESMO montre que la combinaison des deux chaînes énergétiques permet de compenser certaines limites propres à chacune : la batterie assure les trajets courts et l'usage en zones à faibles émissions, tandis que le moteur hydrogène permet de prolonger l'autonomie sur des trajets plus longs et de maintenir la charge. L'architecture hybride rechargeable apparaît ainsi comme une réponse sociotechnique à la fois aux contraintes de stockage et à la rareté des infrastructures de ravitaillement en hydrogène.

3.4. Performance d'usage : autonomie, continuité de service et coût total

Au-delà des seuls paramètres techniques, la performance d'usage constitue un déterminant majeur de l'adoption de la technologie de motorisation. Les résultats du projet NESMO peuvent être interprétés selon les quatre dimensions définies en section 2.1.1.

Sur la *continuité de service*, l'architecture hybride rechargeable permet de couvrir sans rupture de charge l'essentiel des trajets types : en zone urbaine, le véhicule fonctionne en

mode électrique, ce qui limite les émissions locales, respectant ainsi les contraintes liées aux zones à faibles émissions ; sur autoroute ou pour des trajets longue distance, le moteur hydrogène prend le relais et compense l'autonomie limitée de la batterie.

Quant au *coût complet d'usage*, le moteur thermique hydrogène peut, dans certaines configurations, bénéficier de la réutilisation de composants et de plateformes existants ; la compétitivité à long terme dépendra toutefois de la baisse du coût de l'hydrogène bas-carbone et de l'industrialisation progressive de la filière. Des incitations demeurent nécessaires à court terme pour amorcer le marché. La viabilité économique de l'hydrogène dans les transports reste conditionnée par les coûts de production, d'infrastructure et d'usage, ainsi que par son positionnement dans le mélange énergétique global (AJANOVIC & HAAS, 2018).

Concernant la *compatibilité avec la réglementation et les infrastructures*, c'est la faible densité du réseau de stations qui constitue la contrainte dominante : l'hybridation en atténue les effets sans les supprimer et la section 5 montre que cette dimension se joue à l'échelle des territoires plus qu'à celle du véhicule.

Enfin, par référence à l'*inscription territoriale*, la pertinence de la solution varie selon les profils de déplacement et la morphologie urbaine : elle est la plus forte là où des flottes captives et des trajets réguliers permettent d'adosser l'usage à une station unique. Une technologie ne contribue donc significativement à la transition énergétique que si elle s'inscrit dans une expérience d'usage fluide, économiquement soutenable et territorialement située — ce qui conduit directement à l'examen des conditions territoriales du déploiement.

3.5. De la performance technique aux conditions qui président au déploiement

Les résultats convergent vers un constat central : la performance technique, bien que nécessaire, n'est pas suffisante pour garantir le déploiement. Les verrous identifiés — combustion rapide, formation de NOx, stockage haute pression, complexité architecturale — peuvent être traités par des innovations en matière d'ingénierie et par une démarche d'optimisation progressive de la solution de motorisation. Dans ce domaine, les leviers existent : l'injection directe, la simulation avancée, les stratégies de mélange adaptées et les dispositifs de sécurité renforcés.

Cependant, la performance d'usage et la capacité à évoluer dans un environnement contraint conditionnent la diffusion. La solution hybride rechargeable apparaît comme une technologie de transition qui permet de sécuriser l'expérience utilisateur dans un contexte où le réseau de stations hydrogène reste embryonnaire. La technologie proposée constitue donc non pas seulement une innovation d'ordre technique, mais aussi une solution pleinement intégrée qui articule la conception technique et les contraintes d'usage. En ce sens, les résultats techniques doivent être interprétés comme une première étape d'un processus plus large de déploiement sociotechnique. La section suivante examine précisément les verrous et les leviers territoriaux qui déterminent la capacité des villes et des territoires à accompagner, ou non, cette trajectoire d'innovation.

4. Résultats : verrous et leviers territoriaux

Ces dynamiques différenciées de déploiement peuvent être interprétées à travers le prisme des transitions sociotechniques, qui mettent en évidence le rôle des contextes territoriaux dans la diffusion des innovations énergétiques (GEELS, 2012 ; HANSEN & COENEN, 2015).

4.1. Gouvernance multiniveaux et hiérarchies administratives

Les résultats issus des entretiens et de l'analyse documentaire montrent que le déploiement d'une solution hydrogène ne peut être compris indépendamment de la structuration multiniveaux de la gouvernance territoriale. Les politiques énergétiques et de transport propre s'inscrivent dans un système hiérarchisé associant les communes, les intercommunalités, les départements, la région et l'État. Cette structuration produit des effets différenciés sur la prise d'initiative et la capacité d'investissement des collectivités. Les entretiens révèlent que, dans de nombreux cas, les décisions stratégiques relatives aux grandes infrastructures ou aux orientations de mobilité sont perçues comme relevant principalement de l'échelon régional ou supra-communal. Les municipalités, en particulier les plus petites, disposent de marges d'action contraintes et tendent à s'aligner sur des cadres définis à un échelon supérieur de la décision politique. Cette dépendance hiérarchique peut constituer un verrou lorsqu'elle ralentit l'expérimentation locale ou limite l'adaptation aux spécificités territoriales. Ces informations ont été collectées notamment par le biais des entretiens de type semi-structuré (voir section 3.4). Les personnes interrogées ayant souhaité conserver l'anonymat, il est néanmoins possible de citer un extrait anonymisé issu de l'un des entretiens pour soutenir les résultats : « *La région Île-de-France possède les compétences principales dans le domaine des transports, où Île-de-France Mobilités joue un rôle majeur. Les intercommunalités ont également un rôle à jouer, mais moins que la Région, et les communes, particulièrement les plus petites, s'alignent souvent sur les politiques des échelons supérieurs* ».

À l'inverse, la coordination multiniveaux peut devenir un levier lorsque les stratégies sont alignées et que les dispositifs de financement sont cohérents. À ce titre, la présente recherche met en évidence que la cohérence « verticale » des politiques publiques apparaît comme une condition essentielle pour sécuriser les investissements dans des infrastructures dédiées, à l'image des stations de recharge en hydrogène.

4.2. Capacités budgétaires et priorités politiques

Un second verrou majeur identifié concerne les ressources financières et les arbitrages budgétaires. Les entretiens montrent que la capacité à engager des investissements dans des solutions innovantes dépend fortement de la dotation en ressources propres des collectivités et de leur situation financière. Les indicateurs budgétaires constituent des variables structurantes dans la décision d'adopter ou non une technologie émergente. Dans un contexte de contraintes budgétaires, les collectivités privilégient souvent des solutions jugées plus matures ou immédiatement opérationnelles, telles que l'électrification de flottes captives ou le recours à certains biocarburants.[25] L'hydrogène est fréquemment perçu comme une option de moyen ou long terme, notamment en raison du coût des infrastructures et de la faible densité actuelle du réseau de ravitaillement. En effet, selon l'une des personnes interrogées lors des entretiens : « *De nombreuses personnes ont toujours des doutes importants concernant l'hydrogène en raison du coût des infrastructures et de l'insuffisance actuelle du réseau de ravitaillement. L'hydrogène est plutôt perçu comme une solution sur le moyen et le long termes, même si cela reste encore à démontrer* ».

Toutefois, la capacité budgétaire peut également devenir un levier lorsque des collectivités dotées de ressources importantes choisissent d'investir dans des projets pilotes ou des démonstrateurs. Les grandes villes ou pôles urbains disposent le plus souvent des moyens

[25] *Ibid*. « Aujourd'hui, l'hydrogène ne semble pas être une priorité pour les collectivités au sein de la Région Île-de-France. C'est l'électrification massive des transports qui est privilégiée pour l'instant ».

nécessaires pour expérimenter des solutions innovantes et pour structurer des écosystèmes locaux. À cet égard, l'existence de mécanismes de cofinancement ou de partenariats public-privé renforcerait cette capacité d'initiative.

4.3. Infrastructures de ravitaillement : verrou structurant et levier ciblé

La rareté des stations de recharge en hydrogène constitue l'un des verrous territoriaux les plus explicites. Le projet NESMO souligne que le nombre limité de stations en Île-de-France freine mécaniquement l'adoption de véhicules à hydrogène. Sans réseau suffisamment dense, l'usage quotidien demeure contraint et l'incertitude logistique pèse sur les décisions d'investissement des acteurs publics comme privés.[26] Ce verrou produit un cercle vicieux : la faiblesse de la demande limite l'extension du réseau, tandis que la faiblesse du réseau limite la demande. La sortie de ce cercle suppose une stratégie ciblée. Les résultats montrent que le déploiement initial peut s'appuyer sur des usages captifs, tels que des flottes de bus ou de véhicules de service, adossées à une station unique dédiée. À cet égard, la mise en service par Île-de-France Mobilités, le 12 septembre 2019, de deux bus à pile à combustible sur la ligne 264 reliant Versailles-Chantiers à Jouy-en-Josas — 12,5 km, environ un millier de voyageurs quotidiens — illustre cette logique de couplage entre infrastructure et usage. Le service, exploité par la SAVAC dans le cadre du programme européen 3Emotion pour une expérimentation de sept ans, s'appuie sur une station unique installée par Air Liquide aux Loges-en-Josas, commune qui figure dans notre échantillon (Tableau 3).[27]

L'infrastructure apparaît donc à la fois comme un verrou de premier ordre et comme un levier stratégique lorsqu'elle est intégrée dans un schéma territorial cohérent, articulant la planification des mobilités et des investissements ciblés.

4.4. Hétérogénéité intrarégionale et effets d'échelle

Les analyses comparatives menées dans le cadre de NESMO mettent en évidence une forte hétérogénéité intrarégionale. Les grandes villes disposent généralement d'équipes administratives structurées, d'une ingénierie interne et de marges budgétaires supérieures, ce qui leur permet d'élaborer des stratégies de mobilité ambitieuses et de mobiliser des financements. À l'inverse, les communes de taille plus modeste présentent des capacités plus limitées et une dépendance accrue aux orientations régionales ou intercommunales.[28] Cette asymétrie peut ralentir la diffusion d'une innovation comme l'hydrogène, en créant des territoires « pionniers » et d'autres plus attentistes.

En revanche, cette hétérogénéité peut aussi être mobilisée comme levier, en s'appuyant sur des pôles urbains moteurs capables d'initier des dynamiques d'apprentissage et de diffusion. Une stratégie polycentrique, fondée sur la mise en réseau de territoires aux capacités

[26] *Ibid.* « Même s'il y a maintenant environ une dizaine de stations-services à hydrogène en Île-de-France au total, cela demeure très insuffisant pour permettre un déploiement plus large de l'hydrogène dans la région ».
[27] *Ibid.* « Au niveau des transports publics, des expériences ont été menées au cours des dernières années dans plusieurs départements en Île-de-France dans lesquelles le déploiement initial de l'hydrogène a pu s'articuler autour des flottes de bus ou de véhicules de service existants, mobilisant une station unique dédiée à la liaison entre deux communes par exemple ».
[28] *Ibid.* « Les petites communes sont trop souvent délaissées et dépendantes par rapport aux intercommunalités et à la région. En effet, il y a souvent un manque d'entreprises et une faible population dans ces petites communes, donc peu de motivation pour investir dans les transports en général, ce qui inclut les transports propres ».

différenciées, apparaît comme une piste pertinente pour favoriser la montée en échelle progressive.

4.5. Morphologie urbaine et articulation aménagement–énergie

Au-delà des variables institutionnelles et budgétaires, les résultats soulignent l'influence déterminante de la morphologie urbaine. L'analyse quantitative met en évidence le lien entre la consommation d'espace, la densité productive et l'empreinte carbone. Les villes caractérisées par une faible densité et une forte dépendance vis-à-vis de l'automobile présentent des profils d'émissions distincts de ceux des territoires plus compacts. Cette dimension structurelle constitue un facteur clé dans l'évaluation du potentiel de déploiement de l'hydrogène. Une stratégie énergétique dissociée des choix d'aménagement risquerait de produire des effets limités. À l'inverse, l'articulation entre la planification urbaine, l'organisation des mobilités et le développement d'infrastructures énergétiques peut constituer un levier majeur. Ainsi, les résultats suggèrent-ils que le déploiement d'une solution hydrogène doit être intégré à une réflexion plus globale sur la forme urbaine et les trajectoires de développement territorial. L'innovation technologique ne peut produire ses effets que si elle est inscrite dans une stratégie cohérente combinant les infrastructures, la gouvernance multiniveaux et polycentrique de l'énergie et des transports, ainsi que l'aménagement du territoire.

Tableau 3 — Morphologie urbaine et empreinte carbone des communes de l'échantillon

Commune	Département	Intercommunalité	Habitants	Superficie (km²)	Densité (hab./km²)	Émissions par hab. (t CO_2e)	Densité de consommation (m²/hab.)	Densité de production (€/m²)	Intensité d'émissions (g CO_2e/€)
Saclay	Essonne	CA Paris-Saclay	4 261	13,65	312	12,14	3 203,47	12,76	296,91
Angervilliers	Essonne	CC Pays de Limours	1 725	9,01	191	11,45	5 223,19	6,70	327,46
Chilly-Mazarin	Essonne	CA Paris-Saclay	19 943	5,57	3 580	7,06	279,30	99,42	254,40
Vélizy-Villacoublay	Yvelines	CA Versailles Grand Parc	22 836	8,93	2 557	5,51	391,05	87,79	160,46
Les Ulis	Essonne	CA Paris-Saclay	25 165	5,18	4 858	4,42	205,84	116,30	184,63
Guyancourt	Yvelines	CA Saint-Quentin-en-Yvelines	29 269	13,00	2 251	4,36	444,16	66,79	146,92
Les Loges-en-Josas	Yvelines	CA Versailles Grand Parc	1 661	2,48	670	4,27	1 493,08	32,90	86,93
Jouy-en-Josas	Yvelines	CA Versailles Grand Parc	7 983	10,14	787	3,74	1 270,20	33,76	87,20
Massy	Essonne	CA Paris-Saclay	50 506	9,43	5 356	3,67	186,71	157,85	124,60
Fresnes	Val-de-Marne	EPT Grand-Orly Seine Bièvre	28 556	3,58	7 977	3,62	125,37	229,15	126,09
Orsay	Essonne	CA Paris-Saclay	15 554	7,97	1 952	3,52	512,41	77,75	88,47
Palaiseau	Essonne	CA Paris-Saclay	34 750	11,51	3 019	3,39	331,22	103,51	98,80
Meudon	Hauts-de-Seine	EPT Grand Paris Seine Ouest	45 825	9,90	4 629	2,99	216,04	170,41	81,19
Montigny-le-Bretonneux	Yvelines	CA Saint-Quentin-en-Yvelines	31 854	11,65	2 734	2,61	365,73	99,61	71,57
Magny-les-Hameaux	Yvelines	CA Saint-Quentin-en-Yvelines	9 417	16,64	566	2,44	1 767,02	19,43	70,98
Le Chesnay-Rocquencourt	Yvelines	CA Versailles Grand Parc	31 057	7,02	4 424	2,35	226,04	177,95	58,34
Plaisir	Yvelines	CA Saint-Quentin-en-Yvelines	30 897	18,68	1 654	2,34	604,59	50,99	75,78
Versailles	Yvelines	CA Versailles Grand Parc	83 583	26,18	3 193	2,20	313,22	129,42	54,21
Paris	Paris	Métropole du Grand Paris	2 145 906	105,40	20 360	2,19	49,12	726,35	61,37
Trappes	Yvelines	CA Saint-Quentin-en-Yvelines	33 419	13,47	2 481	2,08	403,06	54,54	94,44
Saint-Cyr-l'École	Yvelines	CA Versailles Grand Parc	20 611	5,01	4 114	2,07	243,07	132,06	64,49

Source : calculs de P. SCHEMBRI, à partir des données INSEE (2021), INSEE – FiLoSoFi (2021) et de l'inventaire territorialisé des émissions de gaz à effet de serre (Citepa, 2021). Sources et définition des trois indicateurs : voir section 3.5. Les communes sont classées par ordre décroissant des émissions par habitant.

Le Tableau 3 souligne que Saclay et Angervilliers, les deux communes les moins denses de l'échantillon (3 203 et 5 223 m² d'espace par habitant), affichent les émissions par habitant les plus élevées (12,1 et 11,5 tonnes de CO_2e), tandis que Paris, Versailles ou Saint-Cyr-l'École, dont la densité de consommation s'établit entre 49 et 313 m² par habitant, se situent entre 2,1 et 2,2 tonnes. L'écart atteint un facteur cinq à l'intérieur d'une même région, pour des parcs de véhicules et des technologies largement comparables. La densité de production révèle une situation inverse, de 6,7 €/m² à Angervilliers à 726,4 €/m² à Paris. La relation n'est toutefois

pas mécanique : Magny-les-Hameaux, troisième commune la moins dense (1 767 m² par habitant), émet 2,4 tonnes par habitant, tandis que Guyancourt et Les Ulis, plus compactes, atteignent 4,4 tonnes en raison de la présence d'activités industrielles. La forme urbaine agit donc principalement à travers l'intensité d'émissions de l'activité, plutôt que par la seule consommation d'espace.

Ce résultat soutient l'argument central de l'article : la forme urbaine pèse sur les trajectoires d'émissions autant que les caractéristiques technologiques du véhicule et une stratégie hydrogène dissociée des choix d'aménagement produirait des effets limités.

Tableau 4 — Matrice comparative des profils de collectivités de l'échantillon

Indicateur (médiane du groupe)	Petite commune (< 15 000 hab.)	Ville moyenne (15 000–45 000 hab.)	Pôle urbain (≥ 45 000 hab.)	Paris (référence)
Nombre de communes de l'échantillon	5	12	3	1
Population	4 261	28 913	50 506	2 145 906
Émissions par habitant (t CO_2e)	4,27	3,46	2,99	2,19
Densité de consommation (m²/hab.)	1 767,0	348,5	216,0	49,1
Densité de production (€/m²)	19,4	99,5	157,8	726,4
Intensité d'émissions (g CO_2e/€)	87,2	96,6	81,2	61,4
Points de recharge pour 10 000 hab.	4,7	2,0	2,2	n.d.
Capacité d'autofinancement / produits de fonctionnement	15,6 %	9,5 %	13,5 %	4,9 %
Encours de dette / produits de fonctionnement	20,8 %	52,9 %	31,4 %	118,1 %

Source : calculs de P. SCHEMBRI à partir des données INSEE (2021), FiLoSoFi (2021), de l'inventaire territorialisé des émissions de gaz à effet de serre (Citepa, 2021) et des comptes des collectivités. Construction de la typologie et des indicateurs budgétaires : voir section 3.5. Les valeurs sont les médianes de chaque groupe ; Paris est présentée à part, comme point de comparaison. n.d. : donnée non disponible.

Le Tableau 4 synthétise cette hétérogénéité selon quatre profils. Il fait apparaître une tension que la seule lecture budgétaire ne restitue pas. Les petites communes présentent la situation financière la plus saine en ratio — une capacité d'autofinancement de 15,6 % des produits de fonctionnement et un encours de dette de 20,8 %, contre respectivement 9,5 % et 52,9 % pour les villes moyennes — mais leurs volumes absolus demeurent sans commune mesure avec le coût d'une station de ravitaillement. Elles cumulent par ailleurs le profil d'émissions le plus défavorable et la densité de production la plus faible, c'est-à-dire une base économique réduite pour amortir un équipement. À l'inverse, les pôles urbains disposent des volumes nécessaires mais de profils d'émissions déjà plus favorables, donc d'un gain marginal moindre. Cette configuration plaide pour une logique de mutualisation intercommunale plutôt que pour une diffusion commune par commune, et conforte la stratégie polycentrique évoquée plus haut.

5. Discussion : conditions de passage à l'échelle et recommandations

Les conditions de déploiement examinées ici engagent des choix collectifs qui ne se réduisent pas à un calcul d'efficacité. Trois questions de justice suscitent notre attention :

La première porte sur l'allocation des ressources publiques : financer une station de ravitaillement à l'échelle d'une intercommunalité mobilise des moyens qui ne seront pas affectés à l'électrification des flottes ou à l'offre de transport collectif.

La deuxième concerne l'équité territoriale : les écarts en termes de capacité budgétaire et d'ingénierie décrits en section 5 laissent prévoir une diffusion d'abord captée par les pôles urbains les mieux dotés, au risque de creuser l'écart avec les petites communes de la grande couronne.

La troisième a trait à la hiérarchisation des usages : dès lors que l'hydrogène bas-carbone restera durablement une ressource rare, son affectation aux mobilités légères plutôt qu'aux usages pour lesquels aucune alternative n'existe — industrie lourde, transport routier de marchandises, transport maritime — constitue un arbitrage qui doit être explicité plutôt que subi.

Ces trois questions forment la contrepartie normative du cadre proposé : elles déterminent moins ce qui est techniquement faisable que ce qui peut être justifié collectivement.

5.1. Dépasser les inerties : synchroniser l'innovation, les infrastructures et l'aménagement

Les résultats obtenus confirment que le passage à l'échelle d'une solution hydrogène dépend non pas uniquement de la maturité technologique, mais de la capacité à structurer des conditions sociotechniques favorables à son déploiement (GEELS, 2012 ; SCHOT & GEELS, 2008). Ils soulignent notamment que les verrous techniques identifiés – combustion rapide de l'hydrogène, formation de NOx, contraintes de stockage – ne constituent pas, à eux seuls, les principaux obstacles au déploiement. Ils peuvent être traités par l'ingénierie, la modélisation et l'optimisation progressive des systèmes de motorisation. En revanche, les verrous structurels, liés aux infrastructures, aux capacités budgétaires et à l'organisation territoriale, apparaissent plus déterminants pour le passage à l'échelle.

Le projet NESMO insiste sur le poids des inerties urbaines et sur la dépendance aux trajectoires existantes, qui rendent toute transformation rapide difficile. La transition vers une solution hydrogène suppose donc des politiques publiques ambitieuses et coordonnées. Il est nécessaire de synchroniser l'innovation en matière de motorisation et le déploiement des infrastructures de ravitaillement dédiées. Cette synchronisation constitue une condition essentielle à la diffusion de la technologie : une technologie performante sans stations adaptées demeure marginale, tandis que des infrastructures sans usages structurés ne sauraient pas être viables sur un plan économique (SCHEMBRI, 2024). La discussion conduit ainsi à considérer le passage à l'échelle comme un processus tri-dimensionnel associant l'innovation technologique, le développement d'infrastructures ciblées et la planification urbaine. Cette approche intégrée permet de dépasser une vision fragmentée de la transition énergétique.

5.2. Structurer une gouvernance multiniveaux opérationnelle

À ce titre, l'analyse territoriale met en évidence l'importance d'une gouvernance multiniveaux et polycentrique, combinant la coordination « verticale » entre les communes, les intercommunalités, la Région et l'État, et celle « horizontale » entre les acteurs, les villes et les territoires voisins. Cette gouvernance exige une traduction locale des politiques énergétiques nationales et régionales à travers un ancrage territorial fort (BARICHELLA, 2023). Le passage à l'échelle de la solution hydrogène suppose que les responsabilités soient

clairement réparties et que les stratégies soient cohérentes entre les différents niveaux institutionnels. Les petites communes, souvent dépendantes des orientations régionales, peuvent bénéficier d'un cadre stratégique clair et de dispositifs de soutien leur permettant de s'inscrire dans des projets collectifs. Les grandes villes, disposant de ressources plus importantes, peuvent jouer un rôle moteur en expérimentant des démonstrateurs et en structurant des écosystèmes locaux. Dans cette perspective, la coordination interrégionale et la mutualisation des infrastructures apparaissent comme des leviers pertinents. L'intégration de l'hydrogène dans les politiques d'urbanisme et de planification territoriale constitue également une recommandation opérationnelle afin d'anticiper l'implantation de stations de recharge et d'éviter des blocages ultérieurs liés à l'aménagement du territoire.

5.3. Séquencer les solutions énergétiques dans une trajectoire cohérente

L'approche proposée demeure pragmatique et graduelle : l'électrification constitue la priorité à court terme, tandis que l'hydrogène doit être présenté comme une solution complémentaire pour des segments spécifiques, notamment la mobilité lourde et certains usages intensifs. Cette articulation évite de présenter l'hydrogène comme une alternative exclusive et permet de limiter les risques d'impasse technologique. Par ailleurs, les recherches conduites dans le projet NESMO confirment que, dans les territoires étudiés, l'hydrogène est souvent positionné comme une solution de moyen ou long terme. Le passage à l'échelle pourrait ainsi s'appuyer sur un séquençage stratégique : le déploiement initial auprès de flottes captives (tels que les bus urbains et les véhicules de service) avec l'installation de stations dédiées, puis l'extension progressive vers d'autres usages à mesure que le réseau s'étoffe et que les coûts diminuent.

Cette logique graduelle permet d'apprendre par l'usage, de collecter des données sur la consommation et les coûts réels, et de renforcer la crédibilité de la filière. Elle s'inscrit dans une trajectoire d'innovation cumulative plutôt que dans une rupture brutale.

5.4. Médiation des connaissances et apprentissage collectif

Un enseignement majeur du projet NESMO tient à la démarche de recherche interdisciplinaire. Le projet repose sur la co-construction d'outils, la préparation collective des entretiens et l'implication conjointe d'ingénieurs et de chercheurs en sciences humaines et sociales. Cette organisation a permis d'expliciter la technologie auprès des décideurs publics et, en retour, d'intégrer les contraintes institutionnelles et budgétaires dans les réflexions d'ordre technique. L'interdisciplinarité contribue à lever des obstacles non techniques – réglementaires, financiers ou liés à l'acceptabilité sociale de la solution– qui conditionnent la diffusion d'une innovation. La discussion suggère que cette démarche constitue en elle-même un levier de passage à l'échelle : en favorisant la compréhension mutuelle entre les ingénieurs, les chercheurs et les décideurs politiques, elle contribue à aligner la prise de décision avec les réalités et autres contraintes d'ordre opérationnel.

Tableau 5 — Verrous et leviers de déploiement de la solution hydrogène

Dimension	Verrous principaux	Leviers identifiés	Échelle(s)	Illustration / élément probant
Technique	Combustion H_2 rapide : pics de pression, combustions anormales ; risques de pré-allumage/retour de flamme ; formation de NOx thermiques.	Hydrogène prémélangé au collecteur (injection indirecte) avec pilote gazole pour maîtriser l'allumage ; injection directe H_2 à explorer ; optimisation design/calage ; essais optiques et simulation 0D/1D ; modèle GT-Suite calibré ; stratégies mélange pauvre, EGR et suralimentation.	Véhicule / moteur	"Verrous technologiques" explicités + leviers injection/simulation et modèle GT-Suite.
Usage	Autonomie/coût/compatibilité : impact limité si la technologie ne répond pas aux attentes ; dépendance aux stations.	Hybride rechargeable : trajets courts électriques, longs trajets H_2 ; flexibilité si absence station ; maintien promesse d'usage.	Usager / véhicule / flotte	Critères d'usage formalisés + rôle de la technologie hybride rechargeable.
Infrastructure	Réseau de stations peu dense (embryonnaire), frein à l'usage ; faible nombre en Île-de-France.	Synchroniser stations et déploiement ; projets pilotes ; soutien public pour amorçage.	Ville / intercommunalité / région	Peu de stations en Île-de-France + nécessité de synchronisation.
Gouvernance	Arbitrage court terme : priorité à l'électrification/biocarburants ; capacités locales hétérogènes ; dépendance aux échelons supérieurs.	Coordination multiniveaux (verticale/horizontale) ; appui/mutualisation ; politiques territoriales traduisant les stratégies aux échelles locales.	Commune → région → État	Exemple : capacité de Versailles vs. petites communes ; définition gouvernance multiniveaux et politiques territoriales.
Morphologie urbaine	Les émissions varient fortement selon consommation d'espace et densité de production : la forme urbaine peut peser autant que les dimensions techno/économie.	Leviers de planification urbaine : réduire consommation spatiale/habitant ; accroître densité productive ; réduire intensités énergétique/carbone.	Ville / territoire	Résultat central sur morphologie urbaine + leviers explicités par approche IPAT/Kaya élargie.
Médiation	Risque d'impasse si séparation technique/politique ; besoin d'appropriation par décideurs et traduction des contraintes.	Co-construction d'outils ; préparation interdisciplinaire des entretiens ; explication accessible de la technologie ; apprentissage collectif.	Projet / institutions / territoires	15 entretiens préparés de manière interdisciplinaire + outils base/cartographie ; logique d'apprentissage collectif.

Source : Patrick SCHEMBRI

Les entretiens constituent un exemple de l'interdisciplinarité au cœur du projet NESMO. En effet, le politologue a travaillé en étroite collaboration avec les autres scientifiques du projet pour préparer les quinze entretiens semi-structurés avec les élus et administrations locales dans les villes et territoires de l'échantillon. Chacune des questions a été préparée collectivement de manière approfondie. Ainsi, les combustionnistes ont-ils apporté des explications détaillées et des informations précises sur le type de moteur qu'ils développent et modélisent. Cela a permis la co-construction d'une liste de questions à travers une approche interdisciplinaire portant une importance équivalente aux questions politiques de gouvernance

territoriale par rapport aux questions d'ordre technique. Grâce à cela, le politologue a pu mener la plupart des entretiens de son côté avec confiance quant à sa compréhension des aspects techniques du projet. Certains des entretiens ont été réalisés en présence d'un combustionniste, contribuant en cela à mettre en œuvre la démarche interdisciplinaire au regard des pratiques de terrain.

Pareille démarche rend possible l'obtention d'une compréhension interdisciplinaire des succès et des obstacles rencontrés par les élus et les administrations territoriales dans leurs efforts pour développer les transports propres, un élément essentiel pour atteindre la neutralité carbone à l'échelon local.

Par ailleurs, ces entretiens ont permis aux scientifiques du projet d'identifier les termes qui font déjà partie du lexique pour les décideurs locaux dans le secteur des transports propres à travers les territoires de l'Essonne et des Yvelines. Cela comprend une analyse détaillée des obstacles latents, ainsi que des stratégies prometteuses pour le déploiement potentiel des véhicules hybrides avec un moteur thermique à hydrogène au niveau local dans les communes et les territoires de l'échantillon, à la fois du point de vue technologique et économique, ainsi qu'en termes de gouvernance.

La démarche interdisciplinaire s'est traduite par la co-construction d'un système de cartographie numérique et d'une base de données communs, contenant les informations et données collectées durant la phase des entretiens. La cartographie et la base de données comprennent divers indicateurs relatifs aux communes et territoires de l'échantillon, notamment le nombre d'habitants, la superficie/densité urbaine, la structure politique et/ou administrative, la couleur politique, les infrastructures locales pour la mobilité propre, divers marqueurs budgétaires, ainsi que les principales mesures en matière de transport propre. Cela représente un autre aspect important de la collaboration interdisciplinaire au sein du projet NESMO.

Conclusion

L'analyse conduite à partir du projet NESMO met en évidence que le déploiement d'une solution hydrogène fondée sur une motorisation hybride rechargeable ne saurait être appréhendé uniquement sous l'angle technologique. Si les verrous liés à la combustion de l'hydrogène, à la formation des NOx ou au stockage haute pression, constituent des défis réels, ils apparaissent techniquement surmontables à travers l'optimisation de l'architecture moteur et l'intégration d'outils avancés de modélisation.

Les obstacles les plus structurants résident dans les dimensions territoriales et institutionnelles : la rareté des infrastructures de ravitaillement, les contraintes budgétaires locales, la hiérarchie administrative, l'hétérogénéité des capacités d'action entre les communes et les échelons supérieurs de la décision politique, et l'influence déterminante de la morphologie urbaine sur les trajectoires d'émissions. Le passage à l'échelle suppose dès lors une synchronisation entre l'innovation technique, la planification urbaine et la gouvernance multiniveaux et polycentrique de l'énergie et des transports.

L'approche interdisciplinaire adoptée dans le cadre de NESMO constitue en elle-même un levier de diffusion. En articulant la modélisation de la combustion, l'analyse quantitative territoriale et les entretiens avec les décideurs publics, elle permet d'identifier de manière intégrée les verrous et les leviers du déploiement. Cette démarche confirme que l'hydrogène peut être envisagé non pas comme une solution isolée, mais comme un composant d'un

écosystème territorial d'innovation qui comprend plusieurs solutions technologiques en fonction des cas d'usage.

Ainsi, la contribution principale de ce travail réside-t-elle dans la mise en évidence d'une condition essentielle au déploiement : la performance technologique ne devient opératoire que si elle s'inscrit dans une stratégie territoriale cohérente, graduelle et coordonnée. Le déploiement de l'hydrogène dans les villes et les territoires étudiés dépendra alors de la capacité des acteurs à organiser une transition énergétique cohérente, intégrant simultanément les dimensions technologiques, institutionnelles et territoriales.

Références bibliographiques

AJANOVIC A. & HAAS R. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector. *Energy Policy,* 123, pp. 280–288. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.063

ANTROBUS D. (2011). Smart green cities: from modernization to resilience? *Urban Research & Practice*, 4(2), pp. 207–214.

AUBELLE V. & KADA N. (2019). *Les grandes figures de la décentralisation: de l'Ancien Régime à nos jours*. Berger Levrault.

AUBELLE V. & KERROUCHE E. (2021). *Parlons décentralisation en 30 questions*. La documentation française.

BALTA M.Ö. & BALTA M.T. (2022). Development of a sustainable hydrogen city concept and initial hydrogen city projects. *Energy Policy*, 166, 113015.

BARICHELLA A. (2023). *Can Cities, States and Regions Save our Planet? Transatlantic Perspectives on Multilevel Climate Governance. Palgrave Macmillan. Londres.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-33936-3

BIBRI S.E. & KROGSTIE J. (2017). Smart sustainable cities of the future: an extensive interdisciplinary literature review. Sustainable Cities and Society, 31, pp. 183–212.

BO S. & CHENG, C. (2021). Political hierarchy and urban primacy: Evidence from China. Journal of Comparative Economics, 49(4), pp. 933–946. https://doi.org/10.1016/j.jce.2021.05.001

CALVILLO C.F., SANCHEZ-MIRALLES A. & VILLAR J. (2016). Energy management and planning in smart cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, pp. 273–287.

CAPURSO T., STEFANIZZI M., TORRESI M. & CAMPOREALE S.M. (2022). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*, 251, 114898.

CHEN Y., HENDERSON J.V. & CAI W. (2017). Political favoritism in China's capital markets and its effect on city sizes. *Journal of Urban Economics*, 98, pp. 69–87.

CREUTZIG F., JOCHEM P., EDELENBOSCH O. Y., MATTAUCH L., van VUUREN D. P., Mccollum D., & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? *Science,* 350(6263), pp. 911–912. https://doi.org/10.1126/science.aac8033

DANG R. J., SOUSA CARDOSO C. de & LE MOAL R. (2025). *L'innovation au cœur des territoires : Territoires et transitions, construire l'économie de demain*. De Boeck supérieur.

DE JONG M., JOSS S., SCHRAVEN D., ZHAN C. & WEIJNEN M. (2015). Sustainable–smart–resilient–low carbon–eco–knowledge cities: making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 109, pp. 25–38.

EICHLSEDER H., WALLNER T., FREYMANN R. & RINGLER J. (2003). *The Potential of Hydrogen Internal Combustion Engines in a Future Mobility Scenario*. 2003-01-2267. https://doi.org/10.4271/2003-01-2267

European Commission (2019). *The European Green Deal*. Brussels: European Commission, COM(2019) 640 final, 11 December 2019. Available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640

European Commission (2021). *'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality*. Brussels: European Commission, COM(2021) 550 final, 14 July 2021. Available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550

European Environment Agency (2024). *Trends and Projections in Europe 2024: Tracking Progress towards Europe's Climate and Energy Targets*. Copenhagen: EEA Report No 17/2024. doi: 10.2800/54177. https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2024

European Union (2019). Regulation (EU) 2019/631 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles. *Official Journal of the European Union*, L 111, 25 April 2019.

European Union (2023). Regulation (EU) 2023/851 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles. *Official Journal of the European Union*, L 110, 25 April 2023.

EVRARD A. (2014). Les énergies renouvelables et l'électricité : À propos d'un conflit entre un secteur et une alternative de politique publique. *Ecologie & politique*, N°49(2), 67. https://doi.org/10.3917/ecopo.049.0067

FAGELSON J. J., McLEAN W. J. & DE BOER P. C. T. (1978). Performance and NO_x Emissions of Spark Ignited Combustion Engines Using Alternative Fuels—Quasi One-Dimensional Modeling I. Hydrogen Fueled Engines. *Combustion Science and Technology*, 18(1-2), pp. 47-57. https://doi.org/10.1080/00102207808946838

FAURE B. (2021). Droit des collectivités territoriales (6e éd.). Dalloz.

FORAY D. (2025). Innovation Economics for Future Times: *Innovations*, *hors-série* (HS1), 23-23. https://doi.org/10.3917/inno.hs1.2025.0023

FREEMAN C. (1992). *The economics of hope: Essays on technical change, economic growth and the environment. Pinter Publishers. Londres.*

FREEMAN C. (1995). The National System of Innovation in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics*, 19(1), pp. 5–24. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.cje.a035309

FREEMAN C. (2010). Formal Scientific and Technical Institutions in the National System of Innovation. In B.-Å. Lundvall (Éd.), *National Systems of Innovation* (1re éd., p. 173-192). Anthem Press. https://doi.org/10.7135/UPO9781843318903.010

FREEMAN C. & LOUÇÃ F. (2001). As Time Goes By*: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution. Oxford University Press. Oxford.*

FRIEDLINGSTEIN P., O'SULLIVAN M., JONES M. W., ANDREW R. M., HAUCK J., LANDSCHÜTZER P., LE QUÉRÉ C., LI H., LUIJKX I. T., OLSEN A., PETERS G. P., PETERS W., PONGRATZ J., SCHWINGSHACKL C., SITCH S., CANADELL J. G., CIAIS P., JACKSON R. B., ALIN S. R., ZENG J. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3), pp. 965-1039. https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025

FUSE M., NOGUCHI H. & SEYA H. (2021). Near-term location planning of hydrogen refueling stations in Yokohama City. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(23), pp. 12272–12279.

GALLUP J. L., SACHS J. D. & MELLINGER A. D. (1999). Geography and Economic Development. *International Regional Science Review*, *22*(2), pp. 179-232. https://doi.org/10.1177/016001799761012334

GEELS F. W. (2012). A socio-technical analysis of low-carbon transitions: Introducing the multi-level perspective into transport studies. *Journal of Transport Geography, 24*, pp. 471–482. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.021

GEELS F.W. (2019). Socio-technical transitions to sustainability: A review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 39, pp. 187–201. doi:10.1016/j.cosust.2019.06.009.

GEELS F. W. & SCHOT J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3), pp. 399–417. https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003

GEORGE A. L. & BENNETT A. (2005). *Case Studies and Theory Development in the Social Sciences*. The MIT Press.

GLAESER E.L. & GOTTLIEB J.D. (2008). The economics of place-making policies. *Brookings Papers on Economic Activity*, 39(1), pp. 155–239.

HAARSTAD H. & WATHNE M.W. (2019). Are smart city projects catalyzing urban energy sustainability?. *Energy Policy*, 129, pp. 918–925.

HANSEN T. & COENEN L. (2015). The geography of sustainability transitions: Review, synthesis and reflections on an emergent research field. *Environmental Innovation and Societal Transitions,* 17, pp. 92–109. https://doi.org/10.1016/j.eist.2014.11.001

KLINE P. & MORETTI E. (2014a). Local economic development, agglomeration economies, and the big push: 100 years of evidence from the Tennessee Valley Authority. *Quarterly Journal of Economics*, 129(1), pp. 275–331.

KLINE P. & MORETTI E. (2014b). People, places, and public policy: Some simple welfare economics of local economic development programs. *Annual Review of Economics*, 6(1), pp. 629–662.

KÖHLER J., GEELS F. W., KERN F., MARKARD J., ONSONGO E., WIECZOREK A., ALKEMADE F., AVELINO F., BERGEK A., BOONS F., FÜNFSCHILLING L., HESS D., HOLTZ G., HYYSALO S., JENKINS K., KIVIMAA P., MARTISKAINEN M., MCMEEKIN A., MÜHLEMEIER M. S.,WELLS P. (2019). An agenda for sustainability transitions research : State of the art and future directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 31, pp. 1-32. https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.004

LÉLÉ S., & NORGAARD R. B. (2005). Practicing Interdisciplinarity. *BioScience*, 55(11), 967. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055%255B0967:PI%255D2.0.CO;2

LOILIER T. (2010). Innovation et territoire. Le rôle de la proximité géographique ne doit pas être surestimé. *Revue française de gestion*, n° 200(1), 15-35. Cairn.info

LU Y., WANG J. & ZHU L.M. (2019). Place-based policies, creation, and agglomeration economies: Evidence from China's economic zone program. *American Economic Journal: Economic Policy*, 11(3), pp. 325–360.

MARCH H. & RIBERA-FUMAZ R. (2016). Smart contradictions: the politics of making Barcelona a self-sufficient city. *European Urban and Regional Studies*, 23(4), pp. 816–830.

MAROTEAUX F., SEBAI S., MANCARUSO E., ROSSETTI S., SCHEMBRI P., RADJA K., & BARICHELLA, A. (2024). *Numerical and Experimental Analysis of Dual Fuel Hydrogen/Diesel Combustion at Varying Engine Speed on a Single Cylinder Engine*. 2024-24-0044. https://doi.org/10.4271/2024-24-0044

Ministère de la Transition écologique et solidaire (2017). Projet de loi mettant fin à la recherche et à l'exploitation des hydrocarbures – Dossier de presse. Paris: MTES, 6 September. Available at: https://www.ecologie.gouv.fr (Accessed: 3 November 2025).

MOSTAFAEIPOUR A., REZAYAT H. & REZAEI M. (2020). A thorough investigation of solar-powered hydrogen potential and accurate location planning for big cities: a case study. International Journal of Hydrogen Energy, 45(58), pp. 31599–31611. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.211

NAM H., NAM H. & LEE D. (2021). Potential of hydrogen replacement in natural-gas-powered fuel cells in Busan, South Korea based on the 2050 Clean Energy Master Plan of Busan Metropolitan City. *Energy*, 221, 119783.

NEUMARK D. & KOLKO J. (2010). Do enterprise zones create jobs? Evidence from California's enterprise zone program. *Journal of Urban Economics*, 68(1), pp. 1–19.

NEUMARK D. & SIMPSON H. (2015). Place-based policies, in *Handbook of Regional and Urban Economics,* Vol. 5, Elsevier. Amsterdam, pp. 1197–1287.

NICOLAS A., RADJA K., & SCHEMBRI P. (2009). Quelles formations pour un développement soutenable dans les pays en développement ? Une approche par les compétences. *Mondes en développement*, n° 147(3), pp. 29-44. Cairn.info. https://doi.org/10.3917/med.147.0029

NORGAARD R. B. (1994). Development Betrayed: The End of Progress and a Co-Evolutionary Revisioning of the Future. Routledge. Londres. doi:10.4324/9780203012406.

NORGAARD R. B. (2005). Bubbles in a back eddy : A commentary on "The origin, diagnostic attributes and practical application of coevolutionary theory". *Ecological Economics*, 54(4), pp. 362-365. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.014

PETERS G. P., ANDREW R. M., CANADELL J. G., FUSS S., JACKSON R. B., KORSBAKKEN J. I., LE QUÉRÉ C. & NAKICENOVIC N. (2017). Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 7(2), pp. 118–122. https://doi.org/10.1038/nclimate3202

OECD (2018). Rethinking Urban Sprawl*: Moving Towards Sustainable Cities*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264189881-en.

RADJA K., SCHEMBRI P. & BAZIN D. (2016). Quels enjeux de soutenabilité pour l'agriculture indienne ? *Économie rurale*, n° 352(2), pp. 23-39. https://doi.org/10.4000/economierurale.4857

RANA K. K., NATARAJAN S., & JILAKARA S. (2015). *Potential of Hydrogen Fuelled IC Engine to Achieve the Future Performance and Emission Norms*. 2015-26-0050. https://doi.org/10.4271/2015-26-0050

REZAEI M., KHALILPOUR K.R. & JAHANGIRI M. (2020). Multi-criteria location identification for wind/solar based hydrogen generation: the case of capital cities of a developing country. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), pp. 33151–33168.

RUSCHE C. & SCHAEFER T. (2024). Is the EU Fit for 55 and Beyond? *Intereconomics*, 59(2), pp. 77-82. https://doi.org/10.2478/ie-2024-0017

SCHEMBRI P. (2024). La nouvelle économie spatiale à la croisée de plusieurs enjeux sécuritaires : Une analyse des politiques d'innovation en Europe et aux États-Unis. *L'Espace Politique*, *51-52*. https://doi.org/10.4000/12ddw

SCHEMBRI P. & RADJA K. (2015). Green growth and sustainability: new challenges for an economics of quality. *International Journal of Sustainable Development*, 18(1/2), pp. 1–8.

SCHOT J. & GEELS F. W. (2008). Strategic niche management and sustainable innovation journeys: Theory, findings, research agenda, and policy. *Technology Analysis & Strategic Management,* 20(5), pp. 537–554. https://doi.org/10.1080/09537320802292651

SOVACOOL B. K. (2014). What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda. *Energy Research & Social Science,* 1, pp. 1–29. https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.003

VERHELST S. & WALLNER T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), pp. 490-527. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001

VERPEAUX M. (2020). Les collectivités territoriales (6e éd.). Dalloz.

VITAL-DURAND E. (2017). Les collectivités territoriales en France (10e éd.). Hachette Éducation.

WHITE C. M., STEEPER R. R. & LUTZ A. E. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy,* 31(10), pp. 1292–1305. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001

YIGITCANLAR T. & KAMRUZZAMAN M. (2018). Does smart city policy lead to sustainability of cities? *Land Use Policy*, 73, pp. 49–58.

World Bank (2009). *World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography*. World Bank. Washington, D.C.

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

Industries et réindustrialisation des territoires, une lecture géographique



Pr. Sylvie DAVIET
Professeur émérite de géographie
Aix-Marseille Université (AMU)
TELEMMe UMR 7303



Pr. Frédéric LERICHE
Professeur des Universités en géographie-aménagement (CNU section 23)
LIMEEP-PS

Résumé

Dans cet article, nous redéfinissons l'industrie au XXIe siècle, afin de mieux comprendre le processus de désindustrialisation qui a marqué l'Europe et l'Amérique du Nord depuis le dernier quart du XXe siècle. Cette prise de recul nous permet d'appréhender les difficultés d'une nécessaire réindustrialisation des territoires et la place qu'y tiennent les enjeux de soutenabilité. Nous nous appuyons sur une approche spatio-temporelle comprenant : une mise en perspective historique et épistémologique du concept d'industrie, tout comme une lecture géographique de la question industrielle, articulant, du local au global, questions scalaires et grands défis environnementaux. L'article comporte de ce fait quatre parties : (1) l'évolution et la redéfinition de l'industrie ; (2) la désindustrialisation et ses paramètres ; (3) l'émergence et le succès du concept de territoire ; (4) l'enjeu d'une analyse multiscalaire de la réindustrialisation. La conclusion souligne la dimension existentielle de l'industrie pour la France et l'Europe.

Mots-clés

Industrie, désindustrialisation, réindustrialisation, territoire, soutenabilité, souveraineté.

Introduction

Levier de la puissance des États, l'industrie est partout, dans l'espace géographique tout comme dans notre quotidien. Pourtant, et paradoxalement, cette banalisation la rend presqu'invisible. La liste des objets que nous utilisons chaque jour est quasi infinie : brosses à dents, robinets de nos salles de bain, ampoules de nos luminaires, crèmes hydratantes, tasses à café, *blue jeans*, trottinettes, vélos, automobiles, stylos, ordinateurs, téléphones portables… Notre mode de vie est envahi de produits industriels qui, du matin au soir, saturent notre quotidien, sans que nous en ayons véritablement conscience ; et nous consommons ces objets sans connaitre les modalités de leur production. L'idée que nous serions dans une société postindustrielle a trop souvent été instillée dans les esprits, au point d'invisibiliser la réalité du fait industriel. Dans cet article, il nous semble essentiel de déconstruire ce récit, de

questionner les relations entre industrie et territoire, à l'aune de leurs reconfigurations, afin de mieux comprendre le processus de désindustrialisation qui a marqué l'Europe et l'Amérique du Nord depuis le dernier quart du XXe siècle. Cette prise de recul nous permet d'appréhender les difficultés d'une nécessaire réindustrialisation des territoires et la place qu'y tiennent les enjeux de soutenabilité.

Pour cela, nous nous appuyons sur une approche spatio-temporelle comprenant : une mise en perspective historique et épistémologique du concept d'industrie, tout comme une lecture géographique de la question industrielle, articulant, du local au global, questions scalaires et grands défis environnementaux. Cette méthodologie est adossée à une recherche de longue date sur les questions industrielles, en lien avec de nombreux terrains et programmes de recherche[29]. Le texte qui suit aborde de ce fait quatre parties : (1) l'évolution et la redéfinition de l'industrie ; (2) la désindustrialisation et ses paramètres ; (3) l'émergence et le succès du concept de territoire ; (4) l'enjeu d'une analyse multiscalaire de la réindustrialisation.

1. Redéfinir l'industrie au XXIe siècle

Par convention, l'industrie fait ses premiers pas dans l'Angleterre de la seconde moitié du XVIIIe siècle, avec ce qu'il est convenu d'appeler la « révolution industrielle », caractérisée par le développement de l'exploitation du charbon, l'essor de la machine à vapeur, des industries textiles et du chemin de fer. Pour autant, ce point de départ ne doit pas faire oublier que l'industrialisation – comme processus historique et géographique d'expansion de l'industrie – s'appuie sur un double héritage. En effet, les innovations techniques du Moyen Âge – associées à l'essor du capitalisme marchand en Méditerranée et en Europe du Nord – ont permis un premier démarrage de l'économie européenne (GIMPEL, 1975 ; BRAUDEL, 1985 ; MADDISON, 2001). Par ailleurs, et plus singulièrement dans le cas de la France, les manufactures royales de Colbert au XVIIe siècle amorcent l'essor d'une proto-industrie via des secteurs tels que la céramique, le textile, la construction navale, la verrerie et, sur cette base, la trajectoire singulière de l'industrialisation française (COHEN, 1992). Quoi qu'il en soit, la « révolution industrielle » du XVIIIe siècle marque bel et bien une rupture, laquelle repose sur une caractéristique centrale de l'industrie, à savoir l'accroissement de la productivité, résultat de l'adoption d'innovations techniques et de la transformation de l'organisation du travail. C'est ce qu'illustre, par exemple, l'industrie du verre dans laquelle, grâce à la transformation des techniques de production (traditionnelles, tayloriennes, de process) (LONG, 1997), la productivité s'améliore de manière spectaculaire. Ainsi vers 1800, un artisan verrier pouvait-il produire jusqu'à 16 bouteilles à l'heure ; un ouvrier pouvait en produire quelque 2 000 vers 1950, et 16 000 à la fin du XXe siècle (LONG, 1997, cité par BATTIAU, 1998). C'est à travers cette augmentation de la productivité, permise par la transformation continuelle des méthodes de production, que l'expression « révolution industrielle » prend tout son sens.

De ce point de départ spatio-temporel à nos jours, l'industrie n'a cessé de se transformer et de se diffuser par étapes successives et l'industrie contemporaine n'a plus grand-chose à voir avec la proto-industrie du XVIIIe siècle, ou encore celle du XIXe siècle que nous rapportent

[29] Pour la période récente, citons, d'une part, l'ANR IRETRA (Innovation, réindustrialisation des territoires et transformation du travail, 2021-2026) concernant cinq régions françaises et, d'autre part, le programme ENERGON (Transition énergétique et reconfiguration des territoires, 2021-2024) financé par le LABEX DRIIHM et regroupant six Observatoires Hommes-Milieux, quatre en France et deux en Amérique du Nord.

les livres d'histoire, les œuvres léguées par la littérature (ZOLA, DICKENS) ou la théorie critique (MARX, PROUDHON). Les transformations et la diffusion de l'industrie au XXe siècle déplacent le regard, et la recherche en Sciences Humaines et Sociales (SHS) commence à s'emparer du sujet, avec pour premier objectif de définir l'industrie. C'est ainsi que, dans un contexte renouvelé, CLARK (1947) propose sa lecture de l'organisation de l'économie, en trois grands secteurs : primaire, secondaire, tertiaire. Selon cette classification, le secteur primaire regroupe l'agriculture, la pêche et les activités extractives, le secteur secondaire correspond aux activités de transformation et à l'ensemble de l'industrie, tandis que le secteur tertiaire renvoie aux services marchands et non marchands. Par « industrie », nous entendons ici « industrie manufacturière », c'est-à-dire un ensemble d'activités, elles-mêmes composées d'une multitude d'entreprises, qui transforment de la matière première pour en faire des produits semi-finis destinés à l'industrie elle-même (une planche, un semi-conducteur), et des produits finis destinés au consommateur (un meuble, un ordinateur). Toutefois, par-delà cette définition générale et englobante, la recherche en SHS rappelle à quel point l'industrie est une matrice complexe, multiforme, évolutive, aux contours flous, et *in fine* difficile à appréhender (BATTIAU, 1998). La classification de CLARK ne rend donc compte ni de la complexité de l'industrie, ni de son évolution depuis les années cinquante.

Aussi, dans les années soixante-dix et quatre-vingt, les transformations des grandes entreprises amènent-elles à étudier plus finement la nature des emplois et favorisent l'émergence de nouveaux concepts. La distinction entre les fonctions directionnelles (stratégie, R&D, conception, ingénierie, marketing, comptabilité) et les fonctions productives (production manufacturière proprement dite et logistique associée) s'observe dans les grands groupes industriels (BECKOUCHE et DAMETTE, 1993). Cette approche fonctionnelle est une clé de compréhension de la désintégration verticale des firmes (externalisation de certaines fonctions « servicielles »), de l'augmentation de la productivité et du redéploiement spatial des activités. Ce dernier est marqué par une concentration des fonctions directionnelles dans les métropoles (qui voient émerger la notion de « tertiaire supérieur ») et une migration des fonctions productives et péri-productives en périphéries urbaines, voire dans d'autres régions ou pays, ouvrant la voie aux délocalisations industrielles. Dès lors, pour caractériser ces mutations structurelles transcendant des frontières devenues poreuses entre industrie et service, est forgée la notion de *système productif* (CARROUÉ, 1999).

Par la suite, dans les années quatre-vingt-dix et deux mille émergent les notions d'économie de la connaissance, d'économie créative, ou encore d'économie culturelle (Florida, 2002 ; POWER et SCOTT, 2004 ; SCOTT et LERICHE, 2005, LERICHE, DAVIET et al., 2008). Ces notions traduisent l'idée que « *les facteurs de production des biens technologiques ne sont pas hérités de la nature, mais sont des artefacts produits pour servir d'inputs intermédiaires* » (STORPER, 1997, p. 197). En d'autres termes, l'une des caractéristiques majeures de l'industrie de la fin du XXe siècle réside dans le développement de produits voyant leur composante immatérielle (technologique et esthétique) croître, à l'instar des automobiles qui intègrent des systèmes embarqués de plus en plus sophistiqués. Lorsque cette composante immatérielle est prépondérante, on parle « d'industries culturelles ». L'exemple de l'industrie cinématographique en est une parfaite illustration. Apparue à la fin du XIXe siècle, celle-ci ne transforme rien d'autre que de la matière grise, de l'imagination, en un produit culturel. Un film est donc, par essence, un produit « immatériel », *a fortiori* lorsque la pellicule du cinéma historique a laissé la place au « 0-1 » de la digitalisation. Cette révolution digitale à fort contenu culturel ou cognitif connait une croissance quasi-exponentielle dans le

premier quart du XXIe siècle avec les jeux vidéo, les réseaux sociaux, mais aussi avec le stockage de données dans les data centers qui donnent un nouveau pouvoir aux géants de la Tech américaine ou chinoise. En outre, le numérique est fortement consommateur en électricité, en eau et en métaux critiques (BEGON, 2024), ce qui atteste des limites du concept de société postindustrielle.

Depuis le rapport Meadows évoquant les limites de la croissance (1972), la question environnementale s'invite par conséquent dans les débats, avec une intensité croissante : changement climatique, érosion de la biodiversité… À l'échelle mondiale, pour que l'humanité puisse vivre dans un écosystème sain, quelques chercheurs et experts ont identifié des limites planétaires à ne pas dépasser[30]. Cette épée de Damoclès réactualise la défiance suscitée par l'industrie dans le corps social des pays d'ancienne industrialisation, réinterrogeant de ce fait les façons de produire et de consommer. Il convient dès lors de définir un nouveau paradigme productif, en passant d'une économie linéaire (extraire, produire, consommer, jeter) à une économie circulaire (réutiliser, réparer, rénover, recycler) (AGGERI, MICHEAUX et BEULQUE, 2023). Ce changement de paradigme est au cœur des enjeux actuels de réindustrialisation des territoires.

2. Comprendre les dynamiques de désindustrialisation

Cependant, avant d'amorcer la réflexion sur les leviers et les enjeux de la réindustrialisation, il est nécessaire de revenir sur la désindustrialisation, phénomène majeur des cinq dernières décennies qui touche, pour l'essentiel et à des degrés variables, les pays d'ancienne industrialisation, en Europe et en Amérique du Nord. Le terme de « désindustrialisation » renvoie à un phénomène multi-dimensionnel, qui se mesure à travers divers types d'indicateurs : croissance – ou non – de la production industrielle, part de l'industrie dans le PIB, diminution pure et simple – fréquente – du nombre d'emplois, part de l'emploi industriel dans l'emploi total. De manière plus difficile à mesurer, la désindustrialisation se traduit par des fermetures d'usines, ou encore par le recul de la culture industrielle dans les esprits. Parallèlement, nous ne saurions négliger la profonde transformation de la structure sociale et des équilibres socio-politiques qui en découlent.

En plein cœur de la crise économique des années soixante-dix et quatre-vingt, aux États-Unis, BLUESTONE et HARRISON (1982) figurent parmi les premiers chercheurs à tirer la sonnette d'alarme quant à l'ampleur et aux conséquences du phénomène. Avec le temps et en d'autres lieux, le constat sera le même. En France, COLLETIS (2012) témoigne d'une « urgence industrielle ». Bien sûr, selon les méthodologies retenues, les résultats obtenus par les chercheurs et experts varient quelque peu concernant l'ampleur de la désindustrialisation. Ainsi, par exemple, comment comptabiliser les emplois externalisés ? Statistiquement, ces emplois relèvent souvent du secteur tertiaire ; ils sont pourtant indispensables au bon fonctionnement de l'industrie. Quoi qu'il en soit, en dépit de multiples biais statistiques et méthodologiques, le constat reste le même et un consensus se dégage pour considérer que la France, parmi les économies avancées, est l'un des pays les plus gravement touchés par cette désindustrialisation (GALLOIS, 2012 ; DUFOURCQ, 2022). La part de l'emploi industriel dans l'emploi total du pays a régressé de 19 % en 2000 à 11 % en 2020, un recul à comparer avec celui observé dans d'autres pays industriels : sur la même période, recul de 24 % à 19 %

[30] Le concept de limites planétaires est issu d'une étude internationale réalisée en 2009 en collaboration avec le Stockholm Resilience Center et menée par un groupe de 28 scientifiques internationaux.

en Allemagne, et de 17 % à 9 % au Royaume-Uni (VICARD, 2024). Plus largement, l'Europe fait conjointement les frais du recul de l'industrie et d'une perte de compétitivité (DRAGHI, 2024).

Quatre grandes catégories d'éléments concourent à cette désindustrialisation : le recul direct de l'activité dans des secteurs industriels traditionnels soumis à la concurrence internationale (recul non compensé par la croissance dans de nouveaux secteurs), l'amélioration de la productivité, la délocalisation d'établissements et d'emplois à l'étranger, l'externalisation d'une partie des fonctions et des emplois associés (BOST et MESSAOUDI, 2017). En réalité, les causes de cette désindustrialisation font l'objet de débats théoriques, non sans lien, en toile de fond, avec des enjeux d'ordre idéologique et politique. Sur ce point, un consensus semble difficile à dégager. Parmi les facteurs explicatifs de la désindustrialisation sujets à débat, peuvent être mentionnés la modernisation de l'outil productif (la « robotisation », soit un processus de substitution capital / travail), ou, *a contrario*, le sous-investissement productif, lequel fragilise sur le temps long la compétitivité des entreprises face à une concurrence de plus en plus vive à mesure que l'ouverture des marchés, sous l'égide de l'OMC, produisait ses effets. Cette question de l'investissement productif est un exemple typique de la latitude interprétative d'une réalité sujette à conflit idéologique. D'autres facteurs explicatifs sont particulièrement prégnants pour le cas français : spécialisation dans des productions de milieu de gamme dans des secteurs exposés à la concurrence internationale, délocalisations précoces (dans l'habillement ou l'automobile par exemple) (MESSAOUDI, 2012). La concurrence internationale, en particulier la puissance industrielle de la Chine (COLIN, 2025), met en avant des arguments explicatifs liés aux coûts de la main-d'œuvre en France et, plus généralement, dans les pays d'ancienne industrialisation. Toutefois, certaines comparaisons internationales mettent également en avant la question des modalités de gouvernance d'entreprise et des choix collectifs. Ainsi, le système allemand de cogestion (dans lequel les syndicats sont partie prenante de la gestion stratégique de l'entreprise) semble plus apte que le système français (plus sensible à la thèse de la société « post-industrielle ») à conserver les emplois et les entreprises industrielles sur le territoire national.

Dans cette perspective, VICARD (2024) estime que les firmes transnationales françaises commandent à l'étranger quelque six millions d'emplois, rarement « relocalisables », et qui, au demeurant, traduisent une relative bonne santé du capitalisme industriel français. Associant délocalisations et désindustrialisation, cette dimension du problème renvoie, en termes plus théoriques, à l'idée que la mobilité sectorielle et spatiale du capital est un phénomène consubstantiel au capitalisme industriel, en quête de conditions optimales de production (FONTAGNÉ et LORENZI, 2005). Si cet « impératif capitaliste » fait émerger continuellement, par vagues schumpétériennes successives, des technologies, des entreprises et des territoires industriels nouveaux, il s'accompagne, corrélativement, du déclin de « l'ancien » qui résiste et s'adapte, mais qui parfois peut aussi disparaître (STORPER et WALKER, 1989).

3. Ressources, innovation, le rôle des territoires

La désindustrialisation actuelle a certes une ampleur et des caractéristiques structurelles inédites, mais ce n'est pas la première grande crise de l'industrie. D'autres qui l'ont précédée ont favorisé la genèse de la notion de *territoire*. Pour comprendre l'émergence du *territoire*, il nous faut par conséquent en identifier les jalons épistémologiques (DAVIET, 2005).

Revenons tout d'abord à la crise postfordiste des années soixante-dix ayant initié la théorie de la régulation (BOYER et SAILLARD, 1995) et le « tournant territorial » de la fin des années quatre-vingt-dix et du début des années deux mille (PECQUEUR, 2006). Cette crise ébranle le modèle fordiste de la grande entreprise, du travail à la chaîne et du modèle standard. Dans le même temps, le succès de la Troisième Italie avec son réseau de PME agiles, montre qu'une autre voie est possible. BECATTINI (1979, 1992) est le premier à faire un rapprochement entre l'organisation industrielle de la Troisième Italie et le concept de district industriel élaboré par MARSHALL (1890, 1919) dans la période pré-fordiste. MARSHALL a identifié les avantages de la proximité : « *le fait d'être près les uns des autres. Les secrets de l'industrie cessent d'être des secrets ; ils sont pour ainsi dire dans l'air* » (MARSHALL, 1890, livre IV, chapitre X). Il évoque la transmission du savoir-faire, la culture de l'innovation, avant de s'interroger sur l'alternative entre les *économies internes* (de la grande entreprise) et les *économies externes* (issues de la concentration d'un grand nombre de petites entreprises dans une même localité). Fort de cet héritage, BECATTINI (1992) a élaboré plusieurs définitions du district italien, dont la plus synthétique a une portée qui reste pertinente de nos jours : un district industriel est ainsi « *une entité socio-territoriale caractérisée par la présence active d'une communauté de personnes et d'une population d'entreprises dans un espace historique et géographique donné* » (BECATTINI, 1992, pp. 35-56).

Au cours des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, le GREMI (Groupe de recherche européen sur les milieux innovateurs) s'intéresse aux modalités territoriales du processus d'innovation. Selon cette approche, la figure schumpétérienne de l'entrepreneur n'occupe plus la première place ; celle-ci passe au second plan, tandis que la notion de *milieu* surgit dans le paysage scientifique. La thèse défendue soutient que l'innovation du milieu entrepreneurial est un processus endogène, ancré territorialement et doué d'autonomie. Ainsi, AYDALOT (1986), fondateur du GREMI, souligne : « *L'entreprise innovante ne préexiste pas aux milieux locaux, elle est sécrétée par eux. Les comportements innovateurs sont le résultat des interactions entre les acteurs locaux et leur environnement territorial.* » (AYDALOT, 1986, p. 10). Quelques années plus tard, autour de PECQUEUR et GUMUCHIAN (2007), la notion de *ressource territoriale* s'impose dans le bouleversement postfordiste de la mondialisation. Le territoire a acquis progressivement le statut d'objet géographique puis d'objet économique. Ces avancées impactent les politiques publiques en matière de « développement territorial ». En France, on encourage selon les périodes les technopôles, les systèmes productifs locaux, les pôles de compétitivité (GRANDCLEMENT, 2020). À l'instar des politiques menées en ce sens aux États-Unis au début des années quatre-vingt (DAVIET et LERICHE, 2009), la « loi Allègre » de 1999 ouvre le territoire universitaire aux dynamiques d'innovation, en permettant aux chercheurs et enseignants-chercheurs de créer une *startup* ou de déposer des brevets.

Le territoire est aussi devenu un objet politique au centre des préoccupations. On souhaite qu'il soit attractif, compétitif ; plus récemment on l'associe aux enjeux de durabilité. Notons qu'au fil du temps on observe un glissement sémantique « de l'industrie au territoire » (VANIER, 1997). En dépit des politiques de réindustrialisation et des enjeux de souveraineté prégnants depuis 2020, la légitimité de l'industrie dans le territoire n'est pas facile à rétablir. Celles et ceux qui ont suivi les concertations autour des nouveaux projets industriels promus

par le PIA4[31] le savent. Il existe ainsi un paradoxe : l'industrie est perçue comme un pilier de souveraineté, d'innovation et d'emplois qualifiés mais, sur le terrain, nombre d'implantations ou d'extensions suscitent controverses et oppositions (GRANIER, 2025). Cet enjeu « d'acceptabilité sociale » de l'industrie est une réalité complexe, suscitant désormais de nombreux travaux en SHS, à l'heure de la transition écologique et énergétique (GENDRON, 2014 ; DZIEDZICKI, 2015 ; SUBRA, 2016). Le territoire n'est pas seulement une ressource, il peut être dans certains cas un frein et questionner le retour de l'industrie. Il est donc porteur de valeurs apparemment contradictoires que certaines voix audacieuses s'efforcent de concilier, car il est nécessaire de réconcilier production, souveraineté et durabilité.

4. Perspectives multiscalaires de la réindustrialisation

Les progrès dans l'analyse des territoires locaux ne doivent pas nous faire oublier leurs connexions aux échelles régionales, nationales, européennes et internationales, dans un système de plus en plus globalisé (REICH, 1991). La crise postfordiste a préparé un nouveau monde néolibéral qui, associé à l'essor des dragons asiatiques et de la Chine, a provoqué des vagues de délocalisations concernant successivement les secteurs traditionnels et les plus récents (BOST, 2010). Cependant, en dépit de son âpreté, cette mondialisation a construit des années 1980 à 2015 un ensemble de régulations : le marché unique européen à partir de 1992, l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) à partir de 1995 (dans le prolongement des accords du GATT)[32], le cadre onusien en faveur du développement durable (Brundtland, 1987), les différentes COP et les accords de Paris de 2015 sur le climat.

C'est précisément ce contexte qui a permis la mise en place, au sein de l'Union européenne, du Pacte vert (*Green Deal*) au début des années deux mille vingt. La transition énergétique est mise en avant pour prendre en compte les engagements issus des accords de Paris prévoyant d'atteindre la neutralité carbone en 2050 (DAVIET, PERROUX et VELUT, 2025). Le renforcement du marché européen du carbone (*EU emission trading system*) est un instrument de réduction des émissions de gaz à effet de serre, avec le développement des renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Ces orientations concrètes sont déclinées par les États membres. D'où la loi relative à « l'accélération de la production d'énergies renouvelables », adoptée en France en mars 2023, suivie en octobre 2023 par la loi « industrie verte » devant favoriser la transition écologique et la décarbonation de l'industrie, pour la période 2023-2030, ou encore en 2026 le nouveau volet de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)[33].

Le concept de *modernisation écologique* (MOL et al., 2009) exprime l'apport de solutions technologiques aux problèmes environnementaux, en utilisant les mécanismes de marché. Il appartient aux industriels de formuler les projets, trouver les financements, le foncier et obtenir les autorisations nécessaires au sein des municipalités. Les enjeux de durabilité sont associés à une stratégie de réindustrialisation. VELTZ (2022) souligne l'ampleur du défi : il s'agit moins d'une *transition* que d'une *bifurcation*. Ainsi, le programme *France 2030* de soutien aux investissements industriels vise à rattraper le retard dans certains secteurs et à créer de nouvelles filières (batteries, décarbonation, hydrogène vert, SAF[34], SMR[35]). Mais le

[31] 4ème Programme d'investissements d'avenir en France (2022-2029).
[32] GATT : General Agreement on Tariffs and Trade.
[33] Voir : https://www.economie.gouv.fr/ppe-planifier-la-decarbonation-de-la-france
[34] Sustainable Aviation Fuels.

soutien aux investissements ne saurait se limiter aux technologies de rupture, il faut aussi préserver le tissu des PMI, soutenir la commande publique (LLUANSI, 2026), repenser l'attractivité des métiers, des formations, l'organisation du travail …, soit un ensemble de représentations renouvelées de l'industrie.

Un nouveau système industriel se met progressivement en place, mais le cadre géopolitique international en bouleverse la mise en œuvre. L'année 2025 est certes un moment majeur de bascule, avec le second mandat de D. TRUMP comme Président des États-Unis, mais les prémices de ce basculement sont perceptibles dès le milieu des années deux mille dix. L'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022 est un autre marqueur de ces bouleversements. Pour l'Europe, échapper à sa dépendance au gaz russe est un élément de déstabilisation du marché de l'énergie et de hausse des coûts de production. La sortie des États-Unis des accords de Paris met à mal la politique climatique dont l'Europe est le fer de lance et crée un différentiel de compétitivité car, outre-Atlantique, la réindustrialisation repose sur une énergie fossile bon marché (GEOFFRON, 2025). La guerre des tarifs douaniers menée par le locataire de la Maison Blanche à l'Union européenne et au reste du monde ébranle les bases du commerce international, marquant sans doute de manière emblématique la fin de la « *parenthèse libérale* » que le monde a vue se mettre en place après la Seconde Guerre mondiale (LENGLET, 2025). La dépendance numérique de l'Europe vis-à-vis des États-Unis limite également ses marges de manœuvre (NOCETTI, 2021).

Le déficit de compétitivité face à l'industrie chinoise n'est pas moindre. La chaîne de valeur de la transition énergétique sur laquelle l'Europe a tant misé est particulièrement impactée, qu'il s'agisse des énergies renouvelables ou des voitures électriques (FENET, LEBRUN et MOISSON, 2023). Enfin, dans les territoires industrialo-portuaires comme Fos-sur-Mer (DAVIET, AUBERT et GRONDEAU, 2025) ou Dunkerque (BOUTILLIER et al., 2024), l'économie de la décarbonation avance avec des hauts et des bas. Après avoir suspendu un investissement majeur en novembre 2024, Arcelor Mittal confirme en février 2026 1,3 milliard d'euros pour construire un four électrique sur son site dunkerquois, avec le soutien de l'État. Deux paramètres viennent sécuriser ce choix : (1) le renforcement des mesures européennes contre les importations d'acier jugées déloyales, via le système de quotas tarifaires (TRQ) ; (2) la montée en puissance du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF), qui doit progressivement imposer un coût carbone aux importations provenant de pays moins vertueux sur le plan environnemental.

Les acteurs économiques européens scrutent par conséquent les capacités de l'Union européenne à construire une véritable politique industrielle, alors qu'elle s'est construite sur le mythe d'un marché autorégulateur, sur un strict contrôle de la concurrence interne, au nom de la défense du consommateur. Cette approche témoigne d'une incapacité à faire émerger des « champions européens » concurrentiels face aux entreprises rivales (en particulier étatsuniennes et chinoises), fers de lance d'États aux ambitions hégémoniques, traductions industrielles des nouveaux rapports de force internationaux (COLOSIMO, 2024). En ces temps de retour des empires, cette culture européenne de la concurrence « pure et parfaite » au sein de ses frontières, en particulier dans des secteurs tels que la défense ou le spatial, relève d'un aveuglement stratégique risqué. Dans ce contexte, l'appareil réglementaire évolue lentement ; au demeurant, la réglementation peut même se révéler contre-productive dans la

[35] Small Modular Reactor.

mesure où les contraintes normatives pèsent sur la compétitivité des entreprises européennes (ASSENS, 2025). Nous sommes donc encore loin des ambitions du rapport DRAGHI (2024) pour qui l'UE doit augmenter ses capacités d'investissement pour ne pas se laisser décrocher dans la course mondiale.

Conclusion

Dans les pays « occidentaux », l'industrie a une histoire longue. Elle est devenue, au fil du temps, un enjeu central, situé au cœur de notre modèle de société. Il n'est en conséquence guère étonnant que l'industrialisation des pays « émergents », en particulier des pays asiatiques, au premier rang desquels la Chine, ait à ce point fragilisé l'industrie des pays occidentaux, provoquant un véritable choc sociétal. Cette fragilisation a en effet affecté en interne les bases de la cohésion sociale et le fonctionnement même de l'État-providence. Mais elle a aussi remis en question, sur la scène internationale, la position dominante de l'Occident, la souveraineté – technologique et industrielle – des pays qui le composent, mettant au jour leurs dépendances et vulnérabilités.

La réindustrialisation, en France, en Europe, comme aux États-Unis du reste, est donc une question existentielle et par voie de conséquence politique. Elle se heurte à une réalité complexe, car l'industrie est profondément encastrée dans une matrice articulant les lois de l'économie et du marché, les lois de la nature, de ses ressources et de ses limites, les contradictions des acteurs locaux (parfois réticents à la réindustrialisation) ou encore la brutalité des rapports de force internationaux. Nous avons de ce fait besoin d'appréhender cette réindustrialisation au prisme d'une approche systémique, multiscalaire et multidimensionnelle.

Mais n'omettons pas de ce tableau les capacités de rebond, la résilience des territoires et des institutions à différentes échelles. Le projet de loi sur l'accélération industrielle (*Industrial Accelerator Act*), présenté le 4 mars 2026 par la Commission européenne, ouvre peut-être une voie en faveur de la préférence européenne et de la capacité de produire en Europe (le « *Made in UE* »). À l'échelle nationale, les politiques de réindustrialisation ont remis à l'honneur la question de la planification ; les fondations, structures professionnelles et de recherche se mobilisent et multiplient les travaux. À l'échelle locale, il n'est pas rare que l'on observe une coopération sans pareil autour d'un site industriel, entre collectivités et acteurs privés, car au-delà des emplois, des commerces de proximité, des effets d'entraînement sur le reste de l'économie, c'est la vie et l'identité d'un territoire qui se jouent.

Références bibliographiques

AGGERI F., MICHEAUX, H., et BEULQUE, R. (2023). *L'économie circulaire*. La Découverte.

ASSENS C. (2025). *France. Une souveraineté sous influence ?* VA Press.

AYDALOT P. (1986). *Milieux innovateurs en Europe*. GREMI.

BATTIAU M. (1998). *L'industrie. Définition et répartition mondiale*. SEDES.

BECATTINI G. (1979). Dal settore industriale al distretto industriale. Alcune considerazioni sull'unità di indagine dell'economia industriale. *Rivista di Economia e Politica Industriale, 2*, 7–21.

BECATTINI G. (1992). Le district marshallien : une notion socio-économique. In G. Benko et A. Lipietz (Eds.), *Les régions qui gagnent* (pp. 35–56). Éditions de l'Aube.

BECKOUCHE P. et DAMETTE F. (1993). Une grille d'analyse globale de l'emploi. *Économie & Statistiques,* 270, 37–50.

BEGON H. (2024). Numérique et transition écologique : deux transitions récentes et massives. *Administration, 282* (2), 61–65. https://doi.org/10.3917/admi.282.0061

BLUESTONE B. et HARRISON B. (1982) *The Desindustrialization of America: Plant Closings, Community Abondonment, and the Dismantling of Basic Industry*. Basic Books.

BOST F. (dir.) (2010). *Atlas mondial des zones franches*. La Documentation française.

BOST F. et MESSAOUDI D. (2017). La désindustrialisation : quelles réalités dans le cas français ? *Revue géographique de l'Est*, vol.57/1-2 | 2017, http://journals.openedition.org/rge/6333

BOUTILLIER S., LAPERCHE B., et LE S. (2024). *Ports industriels en transition de l'économie circulaire à la décarbonation*. L'Harmattan.

BOYER R., SAILLARD Y. (dir.) (1995), *Théorie de la régulation : l'état des savoirs*. La Découverte.

BRAUDEL F. (1985). *La Méditerranée. L'espace et l'histoire*. Flammarion [1977].

BRUNDTLAND G. H. (1987). *Our Common Future*. WCED.

CARROUÉ L. (1999). Les systèmes productifs européens, nouvelles problématiques, nouvelles méthodologies. *Méditerranée, 3*, 21–26.

CLARK, C. (1960). *Les Conditions du progrès économique*. PUF [1947].

COHEN E. (1992). *Le colbertisme high-tech*. Hachette.

COHEN J. (1987). De la critique des sources statistiques. *Strates, 2*, 21–33.

COLIN C. (2025) Hyper-compétitivité chinoise : pourquoi et jusqu'à quand ? Rexecode – *Analyse et diagnostic*, n° 12, novembre, 16 p.

COLLETIS G. (2012). *L'urgence industrielle.* Le bord de l'eau. Coll. Retour à l'économie politique.

COLOSIMO J.-F. (2024*). Occident, ennemi mondial n°1*. Albin Michel.

DAVIET S. (2025). *Industrie, culture, territoire*. L'Harmattan.

DAVIET S., et LERICHE F. (2009). Innovation et politiques industrielles : approche comparative France/États-Unis. In I. Kharaba (dir.), *Politiques industrielles d'hier et d'aujourd'hui, en France et en Europe* (pp. 213–226). Éditions Universitaires de Dijon.

DAVIET, S., Aubert, T., et Grondeau, A. (2025). Transition énergétique et industrielle, vers un cluster de la décarbonation ? *Questionner les mutations du territoire industrialo-portuaire Fos-Étang de Berre*. https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2025.1338

DAVIET S., PERROUX S. et VELUT S. (2025). Modernisation écologique, territorialisation et gouvernance de la transition. *Annales de Géographie, 764* (4), 51–75. https://doi.org/10.3917/ag.764.0051

DRAGHI M. (2024). *The future of European competitiveness*. Bruxelles, Commission européenne, part A. 79 p., part B. 327 p.

DUFOURCQ N. (2022). *La désindustrialisation de la France, 1995-2015*. Éditions Odile Jacob.

DZIEDZICKI J.-M. (2015). Quelles réponses aux conflits d'aménagement ? De la participation publique à la concertation. *Participations, 13* (3), 145–170.

FENET J.-M., LEBRUN M.-P. et MOISSON A. (2023). La Chine, futur acteur dominant de l'industrie automobile mondiale ? *Annales des Mines - Réalités Industrielles, Mai* (2), 12–15. https://doi.org/10.3917/rindu1.232.0012

FLORIDA R. (2002). *The Rise of the Creative Class*. Basic Books.

FONTAGNÉ L., LORENZI J.-H. (2005). *Désindustrialisation, délocalisations*. La Documentation française.

GALLOIS L. (2012). *Pacte pour la compétitivité de l'industrie française*. Paris, Commissariat Général à l'Investissement, 67 p.

GEOFFRON P. (2025). Trump II et l'énergie : au-delà de la rhétorique, quels impacts ? *Revue de l'Énergie, 676*, 1–6.

GENDRON C. (2014). Penser l'acceptabilité sociale : au-delà de l'intérêt, les valeurs. *Revue Internationale de Communication Sociale et Publique, 11*, 117–129.

GIMPEL J. (1975). *La révolution industrielle du Moyen Âge*. Seuil.

GRANDCLEMENT A. (2020). Les pôles de compétitivité : d'une géographie de l'innovation à une géographie de la production. *Géoconfluences*. https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/la-france-des-territoires-en-mutation/articles-scientifiques/poles-de-competitivite

GRANIER C. (dir.) (2025). *Industrie et habitants, une équation insoluble ?* La Fabrique de l'Industrie.

GUMUCHIAN H. et PECQUEUR B. (dir.) (2007). *La ressource territoriale*. Economica Anthropos.

LENGLET F. (2025). *Qui sera le prochain maître du monde ? La France face au nouveau chaos*. Plon.

LERICHE F., DAVIET S., SIBERTIN-BLANC M. et ZULIANI J-M. (dir.) (2008). *L'économie culturelle et ses territoires*. Presses Universitaires du Mirail (PUM).

LLUANSI O. (2026). *Réindustrialiser : un défi, des solutions, et un choix de société*. Institut Montaigne. Réindustrialiser : un défi, des solutions… et un choix de société | Institut Montaigne

LONG X. (1997). *L'industrie française du verre : étude géographique* [Thèse de doctorat, Université de Lille-1].

MADDISON A. (2001). *L'économie mondiale, une perspective mondiale*. OCDE.

MARSHALL A. (1890). Principles of Economics (livre IV, chapitre X), *«Industrial Organization, Continued. The Concentration of Specialized Industries in Particular Localities»*. Macmillan and Co.

MARSHALL A. (1919). Industry and Trade (livre II, chapitre VI, section 6), *«Business Organization, Continued. Monopolies and Combinations in Their Political Aspects»*. Macmillan and Co.

MEADOWS D., RANDERS J. et BEHRENS W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books.

MESSAOUDI D. (2012). *Les enjeux géoéconomiques, industriels et territoriaux de la délocalisation des entreprises : le cas français*, Thèse de doctorat, Laboratoire Mutations et organisations spatiales / Paris Ouest Nanterre la Défense, 455 p.

MOL A. P. J., SONNENFELD D. A. et SPAARGAREN G. (dir.) (2009). *The Ecological Modernization Reader: Environmental Reform in Theory and Practice*. Routledge.

NOCETTI J. (2021). L'Europe reste-t-elle une « colonie numérique » des États-Unis ? *Politique Étrangère, Automne* (3), 51–63. https://doi.org/10.3917/pe.213.0051

PECQUEUR B. (2006). Le tournant territorial de l'économie globale. *Espaces et Sociétés, 124–125* (1), 17–32. https://doi.org/10.3917/esp.124.0017

POWER D. et SCOTT A. (2004). *Cultural industries and the production of culture*. Routledge.

REICH R. (1991). *L'économie mondialisée*. Dunod.

SCOTT A. et LERICHE F. (2005). Les ressorts géographiques de l'économie culturelle : du local au mondial. *L'Espace Géographique, 3*, 207–222.

STORPER M. (1997). *The Regional World*. Guilford Publications.

STORPER M. et WALKER R. (1989) *The Capitalist Imperative: Territory, Technology and Industrial Growth*, Basil Blackwell.

SUBRA P. (2016). *Géopolitique locale. Territoires, acteurs, conflits*. Armand Colin. https://www.cairn.info/geopolitique-locale--9782200275396.htm

VANIER M. (1997). *De l'industrie au territoire* [HDR, Université de Grenoble].

VELTZ P. (2022). *Bifurcations, réinventer la société industrielle par l'écologie*. Éditions de l'Aube.

VICARD, V. (2024). *Faut-il réindustrialiser la France ?* PUF.

BOURSIER M.-E. (2023). Compliance et éthique industrielle. Revue de droit des affaires, 12(3), 45-78.

LOPEZ J.-C. (2024). Légitimité organisationnelle et territoires. Management et Sciences Sociales, 36(1), 12-34.

EL BETTIOUI R. (2023). Économie circulaire au Maroc. Revue marocaine de gestion, 8(2), 23-56.

ZOLA É. (1890). La Bête Humaine. Charpentier. Paris.

PETIT B. et MARTIN G. (2024). Soutenabilité et gouvernance des industries. IDEES, 1(1), 1-15.

COHEN É. (2022). Souveraineté industrielle : Vers un nouveau modèle productif. Odile Jacob.

Matériaux à Transition de Spin (SCO) : de la recherche fondamentale à l'application industrielle



Nicolas DI SCALA

Maître de conférences (CNU section 28)

GEMaC (Groupe d'Étude de la Matière Condensée)

UMR8635

CNRS

Résumé :

Face à l'insoutenabilité énergétique du « tsunami numérique » et aux limites physiques de la microélectronique conventionnelle, cet article explore le potentiel de rupture des matériaux à transition de spin (SCO – Spin CrossOver) pour une innovation technologique durable. S'appuyant sur une maturité scientifique allant de la découverte historique qui sous-tend la chimie de ces matériaux moléculaires en 1931, à la maîtrise de l'effet photo-physique qu'est le LIESST (*Light-Induced Excited Spin State Trapping*), nous détaillons une méthodologie couplant physique de la matière condensée et simulations numériques massivement parallèles. Une approche par modélisation électro-élastique permet de prédire les comportements coopératifs complexes, tels que l'hystérésis thermique et l'émergence spontanée de structures auto-organisées de type Turing, ouvrant la voie au calcul neuromorphique bio-inspiré. Nous montrons ensuite comment leur sensibilité multi-stimuli et leur capacité de « respiration » mécanique, permettent de concevoir des dispositifs industriels sobres : mémoires moléculaires ultra-denses, capteurs passifs autonomes, actionneurs pour la robotique molle et applications biomédicales. Enfin, cette filière, privilégiant des matériaux abondants (tel que le fer) et une chimie douce, incarne une innovation industrielle éthique, biocompatible, souveraine et réconciliée avec les limites planétaires.

Mots-clés

Transition de spin ; soutenabilité numérique ; simulation massivement parallèle ; innovation bio-inspirée.

Introduction

L'ère numérique, souvent qualifiée d'immatérielle, repose paradoxalement sur une infrastructure physique d'une lourdeur et d'une complexité sans précédent. Si la dématérialisation des services a permis des gains d'efficacité indéniables dans de nombreux secteurs, elle a également engendré un effet rebond massif, connu sous le nom de paradoxe de Jevons : l'efficacité accrue des technologies numériques a stimulé une consommation de

données exponentielle (*ALCOTT, 2005*), annulant ainsi l'avantage en termes de gains d'énergie et de préservation des ressources initialement attendus.

L'humanité génère aujourd'hui plus de 600 exaoctets de données par jour, un volume annuel qui pourrait atteindre 221 zettaoctets en 2026 (*International Data Corporation, 2022*). Les centres de données consomment déjà près de 2 % de l'électricité mondiale, une part qui pourrait doubler d'ici 2026 sous l'effet combiné de l'intelligence artificielle générative, de l'Internet des Objets (IoT) et des technologies de registre distribué (*International Energy Agency, 2024*).

Au-delà de la consommation énergétique, la loi de Moore se heurte à des limites physiques fondamentales (effet tunnel, dissipation thermique). Cette quête de solutions alternatives nous ramène à une découverte fondamentale vieille de près d'un siècle. Dès 1931, des scientifiques observent les premières anomalies magnétiques sur des complexes de fer (*CAMBI & SZEGÖ, 1931*). Les années soixante révèlent le premier cycle d'hystérésis thermique (*KÖNIG & MADEJA, 1960*). En 1984, la découverte de l'effet LIESST (*DECURTINS et al., 1984*) ouvre la voie au contrôle optique de l'état de spin. Plus récemment, l'adressage électrique à température ambiante (PRINS *et al., 2011*) marque une étape décisive vers l'intégration dans l'électronique conventionnelle. Cette lente maturation, passant de la curiosité magnétique à la mémoire pilotable et non volatile, en combinaison avec des travaux théoriques de fond qui ont permis de disséquer l'ensemble des mécanismes physiques à l'œuvre dans ces matériaux, permet aujourd'hui à cette science d'offrir des réponses nouvelles aux défis de la complexité numérique.

L'optimisation incrémentale des technologies existantes (CMOS, stockage magnétique classique) ne suffira pas à garantir la soutenabilité de notre société numérique face aux limites physiques actuelles. Il est impératif d'opérer une rupture technologique majeure en interrogeant la matière à son échelle la plus intime. Plutôt que de miniaturiser indéfiniment des dispositifs macroscopiques, la solution réside dans l'utilisation de molécules individuelles capables de stocker et de traiter l'information. C'est précisément la promesse des matériaux à transition de spin (SCO) : une classe de matériaux « intelligents », réversibles et économes en énergie. Cet article explore leur potentiel, issu de la recherche fondamentale en physique de la matière condensée, et leur utilisation, comme socle d'une nouvelle électronique moléculaire plus sobre, plus éthique et ancrée dans une chimie durable.

1. Le paradigme de l'information moléculaire

Pour comprendre le nouveau paradigme que représentent les matériaux à transition de spin, il convient de rappeler le fonctionnement du stockage de données actuel. Dans un disque dur classique ou une mémoire SSD, un bit d'information (un 0 ou un 1) est stocké dans un grain magnétique, ou une cellule mémoire, composé de plusieurs milliers, voire millions d'atomes. Le passage à l'échelle moléculaire implique de stocker ce même bit sur une unique molécule, offrant une densité de stockage théorique 100 à 1000 fois supérieure.

1.1. La bistabilité électronique : le cœur du mécanisme

Les matériaux SCO appartiennent à la famille des complexes de coordination (*GÜTLICH & GOODWIN, 2004*). Leur architecture s'organise autour d'un ion métallique de la première série de transition (nous prendrons l'exemple du Fe^{II}), encapsulé dans une « cage » de ligands organiques composés d'atomes d'azote ou de carbone (pyridine, triazole, etc…). Ces ligands ne sont pas de simples spectateurs : ils exercent sur l'ion central une « pression »

électrostatique majeure, appelée champ de ligands, qui module sa structure électronique et magnétique.

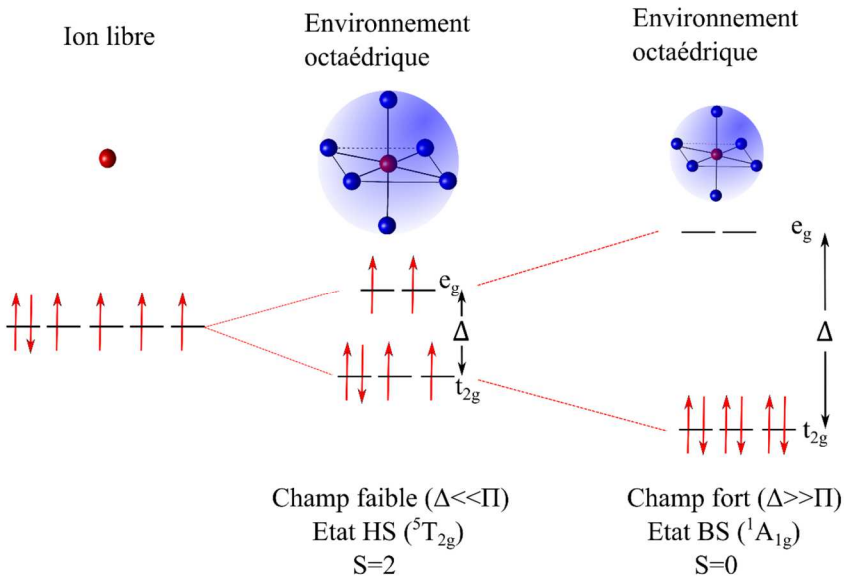


Figure 1 : Diagramme énergétique des orbitales d d'un ion Fe^{II} en environnement octaédrique. Sont représentés, de gauche à droite : l'ion libre, l'état haut spin (paramagnétique, $S = 2$) et l'état bas spin (diamagnétique, $S = 0$). La configuration électronique adoptée dépend de la compétition directe entre l'énergie du champ cristallin (Δ) et l'énergie d'appariement électronique (Π) (d'après SY*, 2016*).

La propriété fondamentale de ces systèmes réside dans la flexibilité (labilité) de leur configuration électronique. Contrairement à un aimant classique aux propriétés figées, l'ion fer se trouve dans un équilibre précaire. Sous l'influence du champ de ligands, il peut exister dans deux états quantiques distincts, selon la répartition de ses électrons dans les orbitales d, comme illustré schématiquement par la Fig. 1.

Le premier état, dit « bas spin » (LS - low spin), correspond à une configuration où les électrons sont appariés par paires au maximum dans les orbitales de plus basse énergie. Cet état est diamagnétique (non aimanté) et correspond thermodynamiquement à une enthalpie plus faible (c'est-à-dire un état énergétiquement plus stable et plus « au repos »). Il est stable à basse température. À l'échelle macroscopique, le matériau est souvent coloré (par exemple en rouge/violet) et compact.

Le second état, dit « haut spin » (HS - high spin), se caractérise par un peuplement des orbitales de haute énergie où les électrons restent majoritairement célibataires, maximisant ainsi le magnétisme. Paramagnétique (aimanté, mais non ordonné comme les aimants à base de fer doux) et doté d'une entropie plus élevée, il correspond à un état de plus grand désordre et d'agitation moléculaire, stable à haute température. Structurellement, ce réarrangement électronique provoque un gonflement de la molécule d'environ 30 % par rapport à l'état LS. À l'échelle du cristal, cela se traduit par une véritable « respiration » du matériau, dont le volume augmente de 3 à 5 % en moyenne, et jusqu'à 7 % en expansion linéaire (*SHEPHERD et al., 2013*). Cette métamorphose, souvent visible à l'œil nu par un changement radical de couleur (du violet au blanc ou du rouge au jaune), offre une interface visuelle directe de l'état

de la mémoire : le matériau joue lui-même le rôle d'afficheur, sans écran ni électronique de lecture.

1.2. La dialectique des effets collectifs et la mémoire

Ce qui rend ces matériaux fascinants pour l'industrie est que la transition entre les deux états n'est pas aléatoire : elle résulte d'une compétition thermodynamique intense entre l'enthalpie (qui stabilise l'état LS à basse température) et l'entropie (qui favorise l'état HS à haute température). L'arbitre de ce duel est la température, comme le résume l'équation de Gibbs : $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. À basse température, l'enthalpie domine ; à haute température, l'entropie prend le dessus et force la transition.

Cependant, la simple commutabilité ne suffit pas à créer une mémoire. Pour stocker l'information, le système doit présenter un cycle d'hystérésis : l'état du matériau dépend non seulement de la température actuelle, mais aussi de son histoire thermique. C'est ici qu'intervient le concept crucial de coopérativité (*KAHN, 1993*) : dans un solide cristallin, les molécules dialoguent mécaniquement via le réseau. Lorsqu'une molécule passe de l'état LS (petit volume) à l'état HS (grand volume), elle exerce une poussée élastique sur ses voisines, les incitant à basculer à leur tour. Cette communication intermoléculaire engendre un comportement collectif en avalanches, créant des domaines macroscopiques. La transition brutale se manifeste par une hystérésis thermique, définissant une zone de bistabilité où, pour une même température, le matériau peut être en état LS (bit « 0 ») ou HS (bit « 1 ») selon son passé, comme illustré par la Fig. 2. C'est la définition physique d'une mémoire non volatile : une fois écrite, l'information est conservée sans apport d'énergie constant, contrairement à la mémoire vive (RAM).

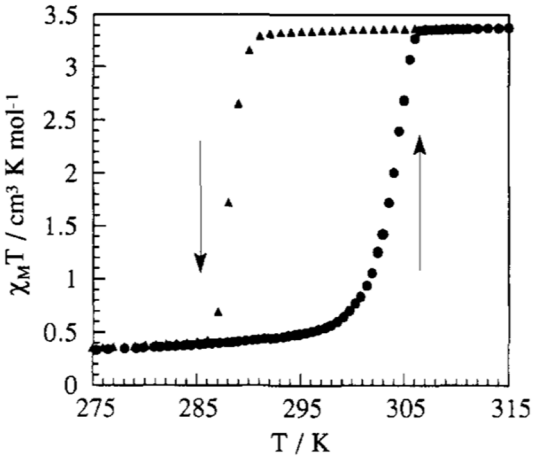


Figure 2 : Cycle d'hystérésis thermique d'un polymère de coordination de type fer-triazole. L'évolution de la fraction magnétique ($\chi_M T$ – c'est-à-dire la réponse des molécules occupant l'état HS) en fonction de la température révèle une transition abrupte et une large zone de bistabilité à la température ambiante ($\sim$295 K $\approx$ 22°C). Dans cette zone, l'état du système est conditionné par son histoire thermique (chauffage ou refroidissement), illustrant un effet mémoire robuste (*d'après KRÖBER et al., 1993*).

1.3. Une sensibilité multi-stimuli pour des applications variées

Si la température est le stimulus le plus évident (thermochromisme), l'intérêt industriel des SCO réside dans leur capacité à répondre à d'autres contraintes physiques. Ces matériaux se

comportent comme de véritables transducteurs moléculaires, capables de réagir à leur environnement immédiat à température ambiante. En voici quelques exemples :

- **La pression (piézochromisme) :** L'état LS occupant un volume plus faible, toute pression externe stabilise cet état au détriment de l'état HS. Le matériau bascule vers sa forme compacte pour soulager la contrainte, à l'image d'une éponge compressée. Si cette opération est réalisée au sein du cycle d'hystérésis, l'état LS ainsi obtenu est stable. La mémoire ainsi enregistrée est non volatile et se maintient sans apport d'énergie extérieure. Cette propriété permet d'envisager des capteurs de pression ou de chocs ultra-sensibles à l'échelle nanométrique.

- **La lumière (commutation optique) :** Au-delà de l'effet LIESST évoqué en introduction, l'irradiation laser pulsée force la transition à des échelles de temps ultra-rapides (femtosecondes pour une molécule unique avec $1\,fs = 10^{-15}$sec, $\sim 100\,fs$ pour une nanoparticule). Cette dynamique hors-équilibre est la clé des futures mémoires opto-magnétiques à très haute vitesse (écriture – effacement).

- **Le champ électrique :** La commutation par champ électrique (sans courant fort, donc sans effet Joule) a été démontrée à température ambiante, ouvrant la voie à des transistors moléculaires à très basse consommation (*PRINS et al., 2011*).

- **L'environnement chimique (chémo-sensibilité) :** Dans les réseaux poreux de type MOF (*Metal-Organic Frameworks*), l'absorption de molécules invitées (solvants, CO_2, gaz polluants) modifie la température de transition. La molécule externe agit comme une clé qui verrouille ou déverrouille l'état de spin (*HALDER et al., 2002*), permettant une détection sans apport d'énergie.

- **Applications biomédicales :** À l'échelle nanométrique, ces composés (et leurs analogues) permettent une hyperthermie ciblée. Sous champ magnétique alternatif ou irradiation laser proche infrarouge, ils agissent comme nano-chauffages intracellulaires, déclenchant sélectivement l'apoptose des cellules tumorales tout en préservant les tissus sains (*ALI et al., 2020* ; *NIGOGHOSSIAN et al., 2022*).

2. La simulation numérique : prédire l'invisible

Si la théorie fondamentale de la transition de spin est bien établie à l'échelle de la molécule unique, sa maîtrise à des fins industrielles se heurte au « mur de la complexité ». Le défi est vertigineux : comment prédire le comportement macroscopique d'un cristal contenant des milliards de milliards de molécules (nombre d'Avogadro $\approx 10^{23}$) à partir des seules propriétés quantiques d'une entité nanométrique ? C'est un peu comme tenter de prédire le mouvement d'une foule entière en ne connaissant que la psychologie d'un petit échantillon de spectateurs.

L'approche expérimentale traditionnelle, fondée sur l'essai-erreur (synthétiser, cristalliser, tester, recommencer), atteint rapidement ses limites. Coûteuse en temps, en réactifs chimiques et en énergie, elle est incompatible avec l'urgence d'une innovation sobre. La simulation numérique intensive s'impose alors comme un accélérateur de recherche indispensable.

Véritable « laboratoire virtuel », elle permet de cribler les matériaux avant même leur fabrication, transformant l'alchimie du hasard en une conception rationnelle de la matière.

2.1. Le modèle électro-élastique : au cœur de la matière, des boules et des ressorts

Pour simuler ces systèmes complexes, nous avons développé un modèle microscopique dit « électro-élastique » (*DI SCALA et al., 2022*) qui couple les degrés de liberté électroniques (l'état de spin quantique) aux degrés de liberté structurels (la position physique des atomes). Dans cette représentation, chaque molécule est modélisée par un nœud d'un réseau cristallin, relié à ses voisins par des ressorts fictifs, comme illustré par la Fig. 3.

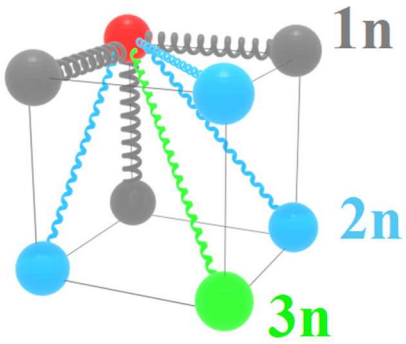


Figure 3 : Maille cristalline du modèle électro-élastique 3D : la molécule centrale (rouge) interagit avec son environnement via un réseau de ressorts ($1n$ gris, $2n$ bleus, $3n$ verts) régissant la coopérativité. Ce couplage mécanique simule la propagation locale des déformations, à l'origine de la « respiration » macroscopique du matériau (*d'après DI SCALA et al., 2022*).

L'Hamiltonien du système, c'est-à-dire la fonction mathématique qui décrit son énergie totale, se compose de deux termes principaux qui s'affrontent :

- Un terme local, dû aux champs et contraintes exercées par les ligands (comme expliqué précédemment), bien connu en physique statistique comme terme de champ à l'instar d'un champ magnétique, et qui n'agit que sur une molécule à la fois, décrivant son état individuel. Il régit la compétition thermodynamique entre l'enthalpie et l'entropie que nous avons décrite plus tôt (le duel LS vs HS).

- Un terme collectif, d'énergie élastique du réseau : c'est le terme crucial pour comprendre l'effet mémoire. Comme le rayon ionique du fer change lors de la transition LS→HS, la distance entre le métal et ses ligands (Fe-N) s'allonge significativement, passant d'environ 1,96 Å en état bas spin à 2,18 Å en état haut spin (*GALLOIS et al., 1990*) – un Ångström (Å) équivalant à 0,1 nanomètre (un nanomètre valant $10^{-9}m$), soit l'ordre de grandeur de la taille d'un atome. Ces déformations, qui peuvent apparaître de façon aléatoire (agitation thermique) à plusieurs endroits du réseau, se structurent et s'organisent pour former des domaines cohérents, qui vont propager ce nouvel état de la matière de manière concertée (coopérative) à tout le réseau cristallin.

Ainsi, cette élongation locale de la liaison chimique (environ 11 %) est le moteur fondamental de la respiration du matériau. Bien qu'atténuée par l'empilement des molécules (ce qui explique l'expansion globale plus modérée de 3 à 7 % évoquée plus tôt), elle induit une distorsion qui ne reste pas confinée au niveau de l'épicentre où elle a été générée. Elle se propage à travers les ressorts du réseau, modifiant le champ cristallin ressenti par les molécules voisines, même à longue distance. Cette propagation mécanique collective est analogue à une *ola* dans un stade.

2.2. Le défi computationnel : dompter la complexité

La résolution de ce modèle électro-élastique pour des systèmes de taille réaliste (millions de molécules) représente un défi informatique considérable. Les interactions élastiques étant non locales, chaque molécule « ressent » quasi-instantanément les déformations de toutes les autres, même lointaines, ce qui fait exploser la complexité algorithmique.

Nous surmontons cet obstacle grâce au calcul massivement parallèle sur processeurs graphiques (GPU). Contrairement aux processeurs classiques (CPU) qui traitent les tâches séquentiellement, les GPU calculent simultanément les forces exercées sur des millions de sites. Des simulations Monte Carlo (basées sur des tirages aléatoires pour explorer les états thermodynamiques) nous permettent ainsi de visualiser en temps réel la nucléation et la croissance des domaines de spin (comme illustré par la Fig. 4), ainsi que l'émergence de structures auto-organisées (Fig. 5). Ces phénomènes évoquent les « structures de Turing », théorisées par le mathématicien Alan TURING pour expliquer la morphogenèse du vivant, comme les rayures du zèbre (*TURING, 1952*).

Cette approche GPU rend enfin abordables des simulations à l'échelle mésoscopique tout en conservant une description microscopique réaliste des phénomènes.

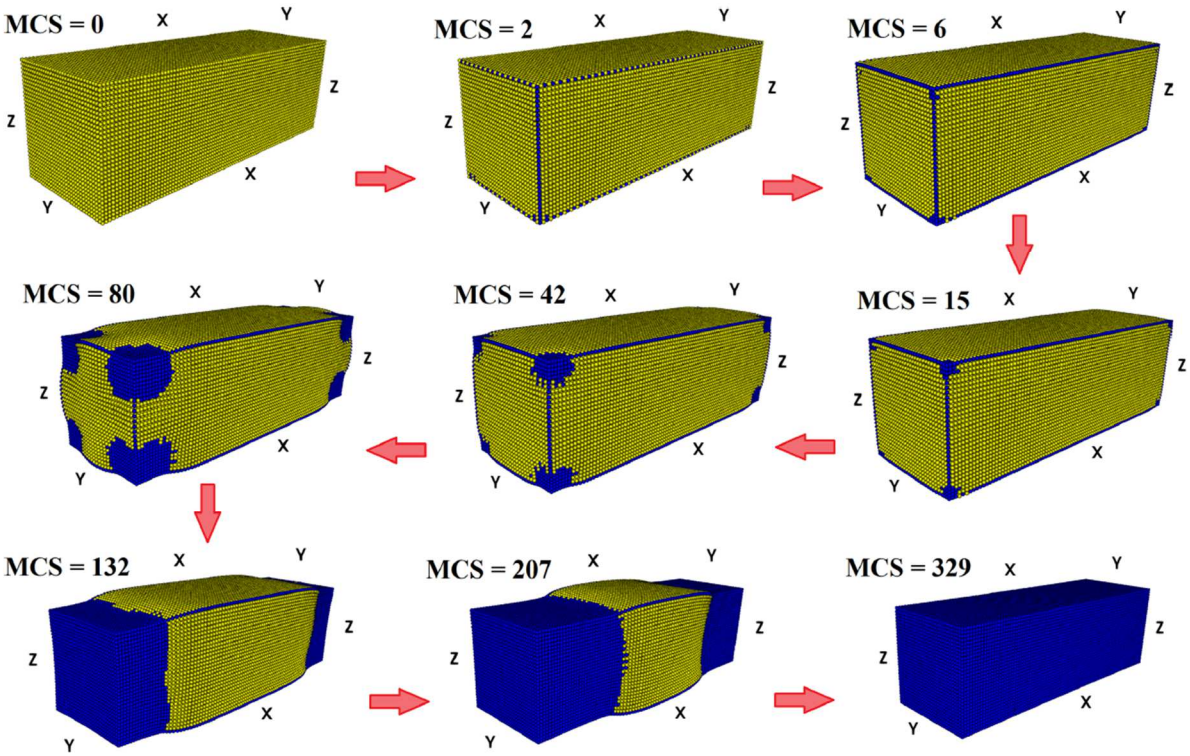


Figure 4 : Dynamique spatio-temporelle de nucléation et de croissance. Instantanés de simulations 3D illustrant la relaxation (T = 1 K) du réseau de l'état HS (jaune) vers LS (bleu). Le fort couplage élastique empêche une commutation aléatoire : la transition démarre sur des germes précis puis s'étend en domaines compacts, illustrant l'effet d'avalanche collectif (*d'après DI SCALA et al., 2022*).

Cette capacité d'auto-organisation du matériau ouvre une perspective majeure pour la soutenabilité numérique : le calcul neuromorphique. Si des architectures électroniques inspirées du cerveau existent déjà sur silicium (*MEROLLA et al., 2014*), nous proposons

d'aller plus loin en exploitant directement la dynamique naturelle de la matière pour traiter l'information à la manière de réseaux de neurones physiques. Des travaux très récents confirment l'immense potentiel des molécules commutables pour diversifier les mémoires et imiter les synapses biologiques avec une efficacité énergétique inégalée (*CHEN et al., 2025*). L'information n'y est plus seulement stockée passivement : elle est activement traitée par la matière elle-même.

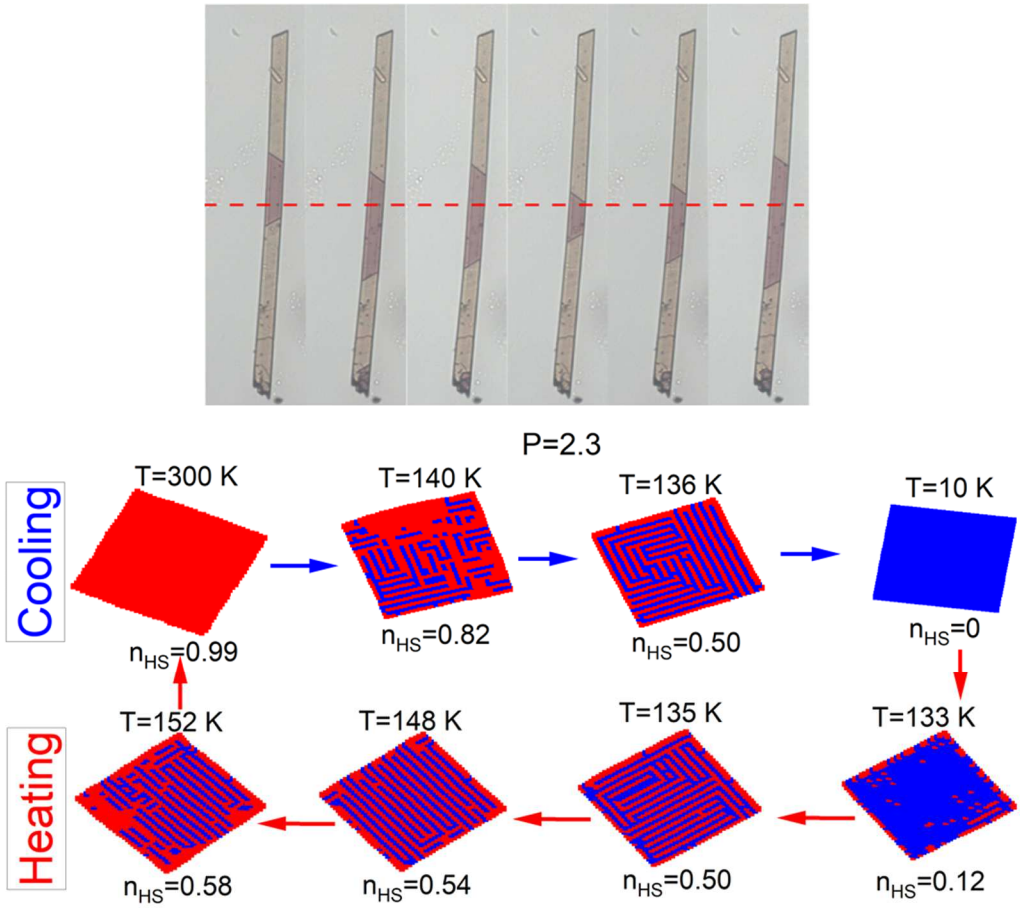


Figure 5 : Auto-organisation et dynamique spatio-temporelle. En haut : clichés de microscopie optique d'un monocristal sous illumination continue, révélant des oscillations autocatalytiques de domaines HS (clair) et LS (sombre). En bas : simulation 2D (modèle électro-élastique sous pression, $P = 2{,}3$ kbar) prédisant l'émergence d'une structure macroscopique en labyrinthe (HS rouge, LS bleu) issue de la compétition des interactions élastiques (*d'après BOUKHEDDADEN, SY & VARRET, 2018* ; *NDIAYE & BOUKHEDDADEN, 2022*).

2.3. Vers des architectures complexes : l'ingénierie des contraintes

Fortes de ces outils de simulation, les recherches actuelles dépassent désormais le cadre du cristal simple pour explorer des nanostructures sophistiquées, ouvrant la voie à des matériaux « sur-mesure ». Une piste très prometteuse concerne les nanoparticules hétérostructurées de type « cœur-coquille ». Le principe consiste à encapsuler un cœur actif (SCO) dans une coquille de matériau inactif ou aux propriétés différentes, comme illustré par la Fig. 6.

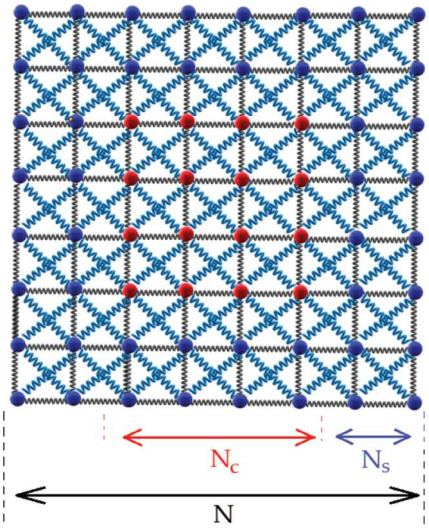


Figure 6 : Modèle électro-élastique 2D d'une nanoparticule cœur-coquille. Le cœur actif (rouge, de taille N_c) et la coquille (bleue, d'épaisseur N_s) interagissent via un réseau de ressorts liant les premiers (1n, gris) et seconds voisins (2n, bleus) (*d'après DI SCALA et al., 2026*).

Nos simulations montrent que la différence de paramètre de maille (la distance à l'équilibre entre les ressorts) du cœur et de la coquille induit une pression interne considérable, qualifiée de frustration élastique (*PAEZ-ESPEJO et al., 2016*). La coquille agit comme un corset mécanique : elle peut soit bloquer le cœur, soit forcer l'apparition de nouveaux états (*SINGH et al., 2020*). Cette ingénierie des contraintes permet de stabiliser des états intermédiaires ou de déplacer la température de transition vers l'ambiante.

Plus audacieux encore, des architectures en couches alternées (structures « sushi ») sont explorées. Empiler des couches aux propriétés élastiques distinctes rend possible de générer des transitions à étapes multiples, permettant de stocker une information multi-niveau (bits 0, 1, 2…) au sein d'une même particule et d'augmenter fortement la densité de stockage. Nos modèles confirment que l'anisotropie élastique et la frustration de réseau favorisent l'auto-organisation vers ces états exotiques (*BELMOURI et al., 2024*).

2.4. Limites de la simulation numérique et lecture critique des résultats

Si le « laboratoire virtuel » électro-élastique accélère considérablement l'exploration des configurations coopératives, il ne saurait ni se substituer entièrement à l'expérience, ni prétendre à une prédiction quantitative universelle. Plusieurs limites structurantes, dont une partie est exposée ci-dessous, méritent d'être explicitement assumées.

D'abord, le modèle repose sur une représentation effective de la molécule (nœud + ressorts) qui, par construction, lisse une bonne partie de sa complexité locale. La molécule est loin d'être ponctuelle comme le montre le schéma de la Fig. 7. Celle-ci a une structure interne

(quantique), une géométrie et une extension spatiale plus ou moins importante en fonction de la taille de ses ligands. À cela s'ajoutent les modes vibrationnels fins de ces derniers et leur désordre d'orientation d'un site à l'autre. Ainsi, il est important d'avoir à l'esprit qu'une molécule à transition de spin comporte entre 50 et 100 atomes en moyenne. C'est donc toute cette structure complexe que nous modélisons par un nœud et quelques ressorts. À l'échelle du réseau cristallin, la structure 3D de ces systèmes peut être extrêmement complexe (voir Figure 7). Les interactions entre molécules ayant lieu soit de manière directe (covalentes quand il y a lieu) soit indirectes via des interactions faibles électrostatiques de type H-H. Signalons enfin qu'au niveau macroscopique, c'est-à-dire à l'échelle du cristal, les défauts cristallins, les hétérogénéités de surface jouent aussi un rôle important. L'ensemble de cette hiérarchie de taille et d'énergie au niveau descriptif ne peut être appréhendé par un seul modèle aussi élaboré soit-il.

Dans notre description, clairement qualitative, les énergies d'interaction élastiques et les paramètres d'anisotropie sont souvent calibrés sur un jeu restreint de composés de référence : leur transférabilité d'une famille chimique à une autre n'est donc pas automatique. Une surestimation de la coopérativité, ou à l'inverse sa sous-estimation, peut déplacer artificiellement la largeur d'hystérésis, la température de transition ou la morphologie des domaines simulés.

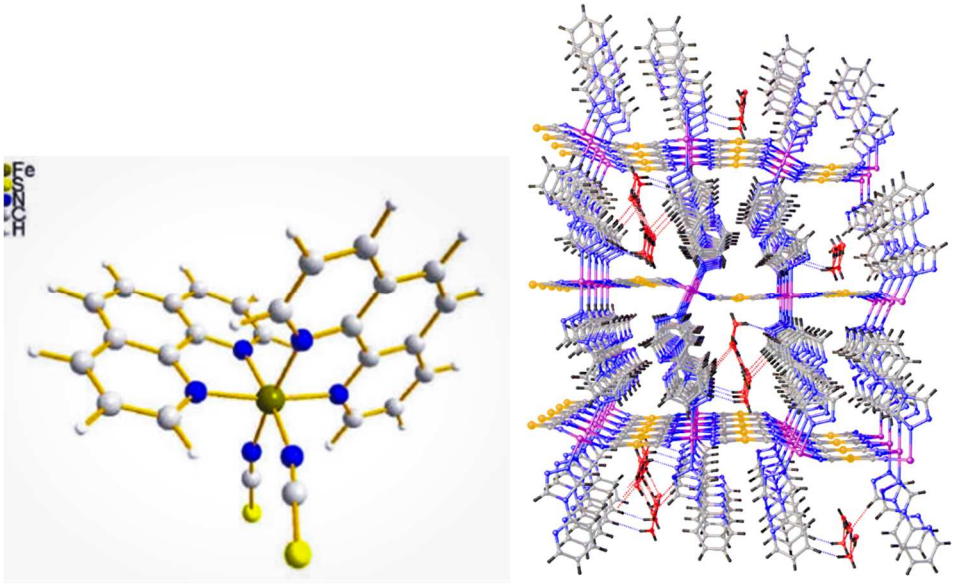


Figure 7 : À gauche, exemple de molécule à transition de spin, $[Fe(phen)_2(NCS)_2]$ (où *phen* est la 1,10-phénanthroline), de petite taille. Au centre (en vert), l'ion métallique de fer(II) entouré d'atomes d'azote (en bleu) en symétrie octaédrique. Les grosses boules grises représentent les atomes de carbone, les petites boules blanches sont les atomes d'hydrogène et les deux boules jaunes sont les atomes de soufre. À droite, structure 3D du composé à transition de spin $Fe(2py\text{-}trz)[Pd(CN)_4]$ (*d'après E. MILLIN et al., 2016).*

Ensuite, les tailles de maillage accessibles, même massivement parallélisées sur GPU, restent inférieures aux volumes macroscopiques d'un dispositif industriel. Les conditions aux limites, les protocoles de thermalisation Monte Carlo et le pas temporel effectif influencent la cinétique apparente de nucléation-croissance. Les belles structures de type labyrinthe ou « Turing » observées en simulation doivent ainsi être lues comme des attracteurs possibles du

paysage énergétique, et non comme des cartographies univoques de tout cristal réel. La confrontation systématique avec la diffraction X haute résolution, la microscopie à effet tunnel (STM) et accessoirement la microscopie optique (résolution de 0,3 microns) ou encore la magnétométrie demeurent indispensables.

Enfin, la chaîne de validation reste elle-même critique : un bon accord qualitatif (forme d'hystérésis, existence d'états intermédiaires, auto-organisation) n'implique pas encore une précision suffisante pour dimensionner un capteur, un actionneur ou une mémoire à spécifications industrielles (fiabilité, dérive et vieillissement, rendement, coût, etc.). En d'autres termes, la simulation SCO est aujourd'hui un outil d'orientation et de conception rationnelle de premier plan, dont la puissance est avérée, mais dont les résultats exigent une analyse d'incertitude, une étude de sensibilité aux paramètres et un dialogue permanent avec la synthèse et la caractérisation expérimentales. Ces travaux d'analyse critique approfondie, volontairement seulement esquissés ici, constituent en eux-mêmes un programme de recherche complémentaire.

3. De la molécule au dispositif : un spectre d'applications durables

Si le stockage de l'information et le calcul neuromorphique restent des « Graal » technologiques à long terme, la richesse phénoménologique des matériaux à transition de spin permet d'envisager une diversification industrielle immédiate. En effet, la « respiration » du matériau que nous avons modélisée – cette expansion de volume couplée au changement de couleur et de magnétisme – peut répondre directement à certains besoins urgents en matière de soutenabilité.

3.1. Actionneurs et robotique molle

Une application directe des modèles élastiques concerne la robotique molle. Puisque le cristal se dilate et se contracte avec une force considérable (densité d'énergie volumique colossale), il peut être utilisé comme un muscle artificiel. Comparés aux actionneurs piézoélectriques (qui nécessitent de très hautes tensions) ou pneumatiques (qui requièrent des compresseurs lourds), les matériaux SCO offrent une alternative compacte, légère et activable à distance. En intégrant ces matériaux dans des composites polymères (*ENRIQUEZ-CABRERA et al., 2020*), notamment sous forme de structures bilames (une couche active sur une couche passive), il devient possible de convertir cette expansion microscopique en une flexion macroscopique géante, comme illustré par la Fig. 8.

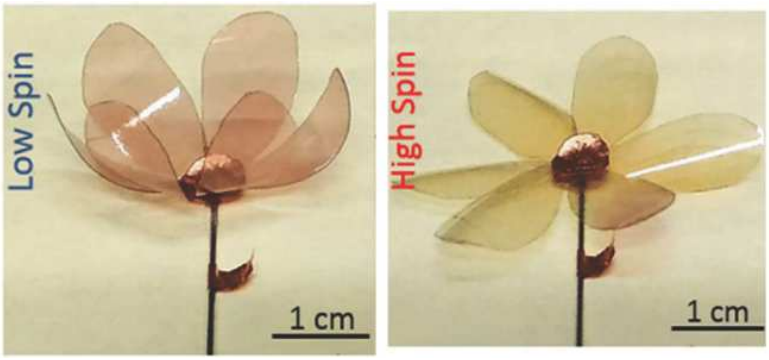


Figure 8 : Actuateur macroscopique bilame. Lors de la transition thermique (LS→HS), l'expansion volumique des particules SCO induit une flexion réversible géante du composite

polymère. Ce couplage thermomécanique est illustré ici par l'ouverture contrôlée de pétales artificiels et un changement de couleur visible (*d'après ENRIQUEZ-CABRERA et al., 2020*).

Mieux encore, en orientant les particules par un champ magnétique lors de la fabrication, on peut créer des actionneurs anisotropes capables de réaliser des mouvements complexes pré-programmés (*PIEDRAHITA-BELLO et al., 2023*).

3.2. L'électronique moléculaire au service de la sobriété numérique

L'application historique de ces matériaux reste la création de mémoires moléculaires ultra-denses. Au-delà de la densité surfacique, c'est l'efficacité énergétique qui prime aujourd'hui. Contrairement aux mémoires magnétiques actuelles, ou à changement de phase (PCM), qui nécessitent des courants électriques importants (effet Joule), la transition de spin peut être déclenchée par des impulsions laser femtosecondes de très faible énergie ou par des champs électriques locaux.

Cette commutation ultra-rapide, qui se produit à l'échelle de la picoseconde ($1\ \text{ps} = 10^{-12}$ sec), voire de la centaine de femtosecondes, permettrait de réduire de plusieurs ordres de grandeur la consommation électrique des centres de données pour le stockage « chaud » (mémoire vive) et l'archivage (*LORENC et al., 2009*). C'est une piste sérieuse pour contrer l'inflation énergétique du numérique.

3.3. L'œil comme interface : capteurs et affichage passif des gaz toxiques

La sensibilité extrême des complexes SCO aux perturbations extérieures en fait des candidats idéaux pour l'Internet des Objets (IoT) durable. En modulant la synthèse chimique, on peut obtenir des matériaux dont la transition est déclenchée sélectivement par la présence en surface (adsorption), ou en volume (absorption), de molécules spécifiques (gaz toxiques, solvants volatils). Le changement de couleur drastique qui accompagne cette transition permet de concevoir des capteurs passifs, lisibles à l'œil nu sans aucune alimentation électrique (*MOLNAR et al., 2018*). Imaginez un patch intelligent sur un emballage alimentaire qui vire du jaune au rouge dès les premiers gaz de dégradation de la viande : l'œil humain suffit pour interpréter le résultat (*SUN et al., 2022*), comme illustré par la Fig. 9. Des applications similaires existent pour le contrôle de la chaîne du froid ou la détection d'impacts en sécurité aérienne (*BOUKHEDDADEN, RITTI et al., 2018*).

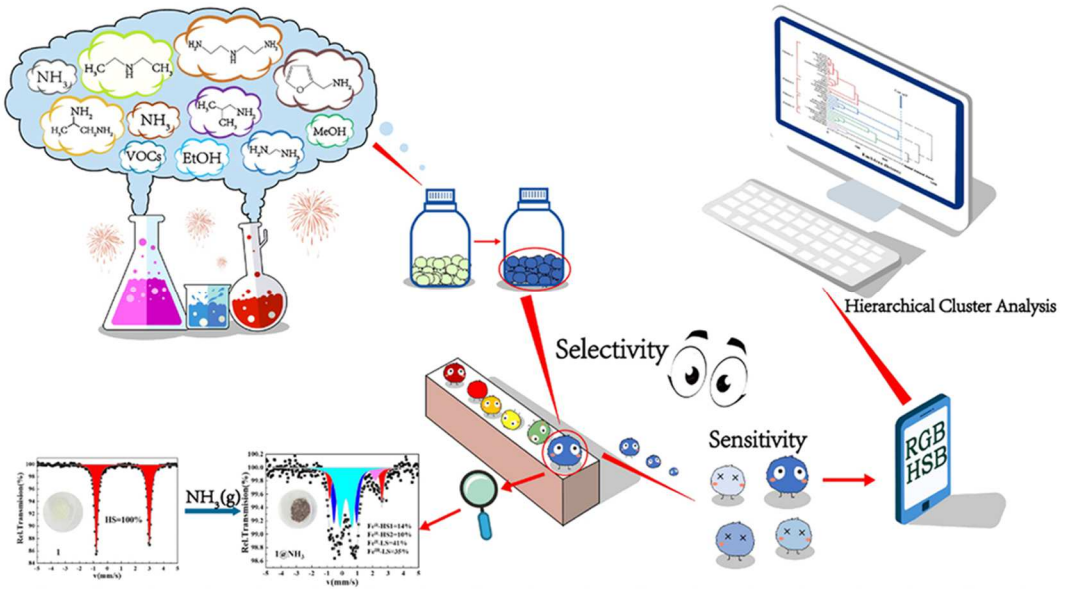


Figure 9 : Patch intelligent à base de complexe Fe^{II} sur emballage alimentaire. Dès l'apparition des gaz de dégradation de la viande (ammoniac et amines), le patch change de couleur de façon visible (jaune → rouge). L'œil humain suffit pour interpréter le résultat, sans aucune électronique forcément nécessaire (*d'après SUN et al., 2022*).

Cette bistabilité optique ouvre aussi la voie à des dispositifs d'affichage passifs. Contrairement aux écrans LED qui nécessitent un rafraîchissement constant, un panneau d'affichage SCO pourrait maintenir une image (un texte, un logo) indéfiniment grâce à l'effet mémoire (hystérésis) sans consommer le moindre électron. L'énergie n'est requise que pour modifier le contenu, réduisant drastiquement l'empreinte carbone du dispositif (*KAHN & MARTINEZ, 1998*).

3.4. Vitrages intelligents et régulation thermique

Enfin, dans le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en Europe (*European Commission, 2020*), les matériaux SCO offrent une solution de régulation passive prometteuse. Incorporés sous forme de films minces ou de nanoparticules dans des vitrages, ils agissent comme des filtres solaires adaptatifs.

À basse température (état LS), le matériau est coloré ou opaque et absorbe le rayonnement solaire pour un réchauffement passif du bâtiment ; au-dessus de la température de transition (état HS), il devient clair et transparent, réduisant drastiquement l'absorption thermique de la façade. Ce contrôle dynamique et autonome des flux thermiques permet de diminuer significativement les besoins en chauffage et climatisation. C'est l'exemple type d'une technologie « *low-tech* » sophistiquée, où l'intelligence est embarquée dans la matière elle-même (*XIAO et al., 2024*), comme illustré par la Fig. 10.



Figure 10 : Prototypes de vitrages intelligents (10 × 10 cm) à base de complexes de coordination thermochromiques métal-ligand intégrés dans un gel. À basse température (côté gauche « *Cool* »), le matériau est opaque ou coloré. Lorsque la température augmente (côté droit « *Heat* »), il devient plus transparent (*d'après XIAO et al., 2024*).

Ce concept s'étend aux peintures et enduits de façade (*LETARD et al., 2007*), transformant les murs opaques en boucliers thermiques adaptatifs. Nos modélisations récentes montrent qu'un revêtement SCO bicouche optimisé agit comme un véritable « tampon thermique », réduisant la charge calorifique et déphasant l'onde de chaleur de près de 10 heures, restituant l'énergie accumulée la nuit plutôt que de surchauffer l'intérieur en journée (*SLIMANI & BOUKHEDDADEN, 2026*).

4. Une innovation « éthique par conception »

L'innovation technologique ne vaut que si elle est soutenable sur l'ensemble de son cycle de vie. L'approche développée autour des matériaux à transition de spin s'inscrit, dès sa conception, dans une démarche éthique forte, en rupture avec les impasses environnementales et géopolitiques de l'industrie microélectronique conventionnelle.

4.1. La géopolitique des ressources : sortir de la dépendance aux terres rares

L'industrie actuelle des hautes technologies repose sur une liste critique de matières premières (dysprosium, néodyme, cobalt, etc.). Leur extraction est dévastatrice pour l'environnement minier et crée une forte dépendance géopolitique envers une poignée de pays producteurs, sans compter le coût humain élevé (*United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2025*). À l'inverse, la grande majorité des complexes à transition de spin est basée sur le fer – le métal de transition le plus abondant de la croûte terrestre – et sur des ligands organiques biocompatibles (carbone, azote, hydrogène). Contrairement aux terres rares classées « critiques » par la Commission Européenne en raison de leur risque d'approvisionnement, le fer reste une ressource accessible, bon marché et non conflictuelle (*European Commission, 2023*). Choisir la filière SCO revient donc à opter pour une souveraineté technologique durable.

4.2. Chimie douce vs industrie lourde

La fabrication d'une puce en silicium est un processus énergivore : elle nécessite la fusion de la silice à plus de 1 400°C (procédé Czochralski), suivie de multiples étapes de purification et de dopage en salles blanches ultra-propres (extrêmement coûteuses), consommant des quantités colossales d'eau et d'électricité (*WANG et al., 2023*). En comparaison, la synthèse

des matériaux moléculaires relève de la « chimie douce ». Elle s'effectue le plus souvent à température ambiante ou modérée (inférieure à 100°C), par des procédés d'auto-assemblage spontané (*BOUSSEKSOU et al., 2011*), comme illustré par la Fig. 11.

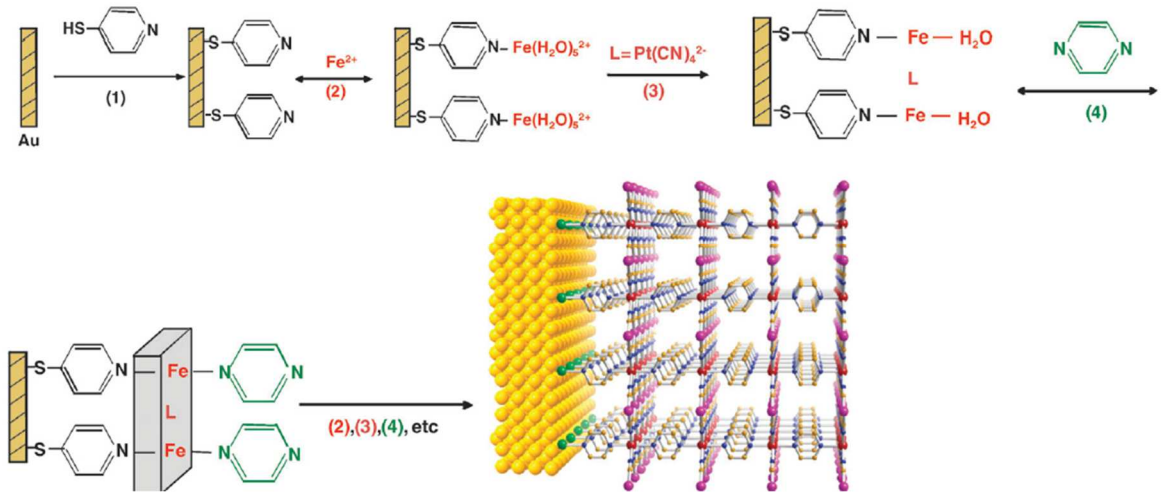


Figure 11 : Synthèse d'un film mince par chimie douce. Le matériau s'auto-assemble séquentiellement (couche par couche) à température ambiante via des réactions alternées entre ions métalliques et ligands. Ce procédé spontané illustre la parfaite sobriété énergétique de la filière (d'après *BOUSSEKSOU et al., 2011*).

Des avancées récentes en chimie douce, telles que l'utilisation des pores ordonnés de monolithes de silice mésoporeuse comme nanoréacteurs pour la synthèse confinée d'analogues du bleu de Prusse, permettent de produire ces matériaux de coordination à température ambiante sans aucun solvant agressif, ni étape mécanique invasive, réduisant l'impact environnemental de la production à son strict minimum (*DELAHAYE et al., 2015*). Cette sobriété de production confère aux matériaux SCO une empreinte carbone initiale potentiellement très inférieure à celle des semi-conducteurs inorganiques.

4.3 Production et qualification expérimentales des matériaux SCO

Au-delà de l'élégance des procédés de « chimie douce », le passage du concept fondamental au matériau fonctionnel requiert une chaîne expérimentale complète allant de la synthèse, la caractérisation, l'intégration, la production à la qualification, souvent négligée ou à peine évoquée dans la littérature.

En matière de production, plusieurs voies peuvent être déployées selon l'application visée :

a) *La synthèse en solution* (précipitation, auto-assemblage métal-ligand) : reste la plus répandue pour les poudres et les nanoparticules ;
b) *Le séchage par atomisation* : permet d'obtenir des poudres processables en plus grandes quantités (*DARO et al., 2017*) ;
c) *Le dépôt séquentiel couche par couche* (assemblage multi-lamellaire) : favorise l'obtention de films minces SCO bistables, y compris à température ambiante (*COBO et al., 2006*) ;
d) *L'intégration dans des matrices polymères ou des composites bilames* : ouvre la voie aux actionneurs et revêtements (*ENRIQUEZ-CABRERA et al., 2020*).

Chacune de ces voies présente ses propres verrous méthodologiques et ses contraintes : maîtrise de la stœchiométrie et de la pureté de phase, contrôle de la taille et de la polydispersité des particules, adsorption aux substrats, stabilité du solvant résiduel ou encore répétabilité.

En matière de qualification, la « carte d'identité » d'un composé SCO se construit par un faisceau de techniques complémentaires :

a) *La magnétométrie SQUID* (ou une balance de Faraday) : quantifie la fraction haut spin en fonction de la température ainsi que la largeur d'hystérésis ;
b) *La spectroscopie Mössbauer du fer* : précise les états électroniques au niveau local en mesurant les champs hyperfins et confirme l'absence d'impuretés ferromagnétiques ou para-magnétiques résiduelles ;
c) *La calorimétrie différentielle :* extrait de manière quantitative les grandeurs thermodynamiques (enthalpies et entropies) à la transition ;
d) *La diffraction des rayons X (monocristal ou poudre)* : suit les paramètres de maille et quantifie le changement de volume de la maille cristalline, c'est-à-dire la « respiration » structurale ;
e) *L'optique (réflectance, microscopie et spectroscopie optiques) :* permet de cartographier l'évolution spatio-temporelle des domaines de transition en couplant couleurs et domaines de spins ;
f) Les dispositifs multi-stimuli (*pression, atmosphère contrôlée, irradiation laser*) : évaluent la réponse du composé à des sollicitations extérieures.

Pour l'intégration dans des dispositifs opérationnels, s'y ajoutent des essais de cyclabilité (nombre de cycles écriture-lecture sans dérive ou dégradation), de tenue en humidité, de vieillissement thermique et, le cas échéant, de biocompatibilité.

Préciser ces protocoles n'est pas un détail opératoire : c'est la condition *sine qua non* pour garantir la comparabilité entre laboratoires, réussir le transfert vers l'industrie et évaluer objectivement le niveau de maturité technologique (*Technology Readiness Level*) de ces matériaux. Un développement ultérieur dédié à ces modes opératoires – du gramme de laboratoire au kilogramme d'usine, et de la mesure physique à la spécification d'usage – constituerait un prolongement naturel du présent travail.

4.4. Le triptyque Université-Industrie-Territoire

Enfin, le développement de cette technologie illustre la nécessité d'un nouveau modèle d'innovation, ancré dans les territoires. Il ne s'agit pas d'importer des technologies « boîtes noires » ou en kits, mais de coconstruire des solutions adaptées. Le lien étroit entre les laboratoires de recherche fondamentale, qui maîtrisent la complexité de l'élaboration des matériaux, de la caractérisation de leurs propriétés physico-chimiques et de la simulation d'une part, et des partenaires industriels qui maîtrisent le génie des procédés en vue de leur intégration dans des peintures ou des capteurs d'autre part, permet de raccourcir les cycles d'innovation (*DARO et al., 2017 ; MOLNAR et al., 2018*). Ce modèle favorise une réindustrialisation intelligente, où la valeur ajoutée réside dans la maîtrise de la formule chimique et du procédé de mise en forme, des savoir-faire non délocalisables.

Conclusion

Face à l'inflation énergétique du secteur numérique et à la crise climatique, la quête d'une complexité matérielle toujours plus miniaturisée mais paradoxalement plus lourde en ressources critiques atteint aujourd'hui ses limites physiques et écologiques. Les matériaux à transition de spin (SCO) offrent une voie de rupture technologique et conceptuelle salutaire. En déplaçant la mémoire et l'adaptation au cœur même de l'architecture moléculaire, ils incarnent un changement de paradigme profond : le passage d'une matière inerte que l'on contraint à une matière « intelligente » qui interagit et s'auto-organise.

La maîtrise de ces comportements coopératifs, rendue possible par les avancées en modélisation réaliste au plus près des phénomènes physiques étudiés, et par la puissance des simulations numériques massivement parallèles, permet aujourd'hui de prédire et de concevoir ces matériaux à l'échelle macroscopique. Ce pont entre physique théorique la plus intime et applications concrètes ouvre des perspectives allant du calcul neuromorphique bio-inspiré à la sobriété énergétique des centres de données.

Au-delà de la micro-électronique, leur capacité de « respiration » mécanique et leur sensibilité multi-stimuli en font des solutions immédiates pour des secteurs fortement émetteurs de gaz à effet de serre. Leur intégration dans la construction durable, via des vitrages intelligents ou des enveloppes thermiques adaptatives, montre que l'innovation de pointe peut apporter des réponses concrètes, passives et « *low-tech* » aux défis de la transition écologique.

Promouvoir la filière des matériaux moléculaires commutables, c'est faire le choix d'une industrie résolument éthique. En s'appuyant sur le fer – métal abondant et non conflictuel – et sur des procédés de chimie douce, cette approche réconcilie innovation de rupture et respect strict des limites planétaires. C'est dans la synergie entre recherche fondamentale, ingénierie appliquée et acteurs locaux que se dessine l'industrie de demain : souveraine, ancrée dans les besoins réels de ses territoires et intrinsèquement soutenable.

Néanmoins, ces perspectives prometteuses ne sauraient masquer les défis majeurs qui subsistent avant une mise à l'échelle industrielle pleinement maîtrisée. La reproductibilité des comportements reste un verrou critique, lié tantôt à un manque de stabilité chimique à long terme (vieillissement), tantôt à une altération progressive des propriétés en cours de fonctionnement (notamment liée à l'amplitude importante du changement de volume). S'y ajoutent la difficulté de synthétiser ces matériaux en quantités importantes avec des procédés encore trop simples et lents, ainsi que la nécessité d'étudier en profondeur leur comportement dans les conditions environnementales réelles (humidité, chaleur excessive, variations de pression, pollution atmosphérique). Certains de ces obstacles pourront être levés par des procédés d'enrobage ou d'encapsulation protectrice, mais d'autres, inhérents à la nature même de ces composés moléculaires fragiles, persistent et exigent une recherche soutenue, tant sur le plan chimique que physique. C'est précisément dans la résolution rigoureuse de ces verrous que résident tout l'intérêt et la richesse de la filière SCO pour les années à venir.

Ces verrous fondamentaux étant posés ; on peut les décliner plus finement selon quatre familles de défis, souvent imbriqués.

1) *Défis matériaux et fiabilité*. Pour être exploitable, la bistabilité à température ambiante doit soutenir des milliers, voire des millions de cycles de commutation sans fatigue mécanique induite par la variation de volume, sans oxydation progressive du centre métallique ni perte de coopérativité par accumulation de défauts structuraux, type dislocations, joints de grains... L'encapsulation, l'élaboration de structures cœurs-

coquilles et l'intégration au sein de composites polymères sont des pistes actives. Cependant, chaque solution de protection ou d'enrobage fait courir le risque de diluer la réponse utile (contraste optique, force d'actionnement, largeur d'hystérésis) ou d'introduire de nouvelles interfaces mécaniques fragiles.

2) *Défis de procédé et de changement d'échelle (up-scaling)*. Passer du milligramme de laboratoire au pilote préindustriel, puis à la production, impose des procédés continus ou semi-continus. Cela exige une gestion des solvants conforme aux réglementations environnementales (ex. REACH), un contrôle en ligne de la qualité et la maîtrise des coûts de l'élaboration compatibles avec les marchés visés (capteurs passifs, revêtements, niches électroniques). Des techniques comme le séchage par atomisation, l'extrusion de composites ou le dépôt de films minces illustrent ces options de passage à l'échelle, dont la maturité demeure inégale selon les familles chimiques considérées.

3) *Défis d'intégration système*. Un matériau SCO ne devient un « produit » fonctionnel/opérationnel qu'une fois couplé à une architecture d'usage : substrat, électrodes, dispositif de lecture optique, *packaging*, électronique de commande, normes de sécurité, etc... Pour des applications dans le domaine des mémoires ou en informatique neuromorphique, la compatibilité avec les lignes de fabrication de microélectronique existantes (températures de process, lithographie, interfaces CMOS) reste un horizon lointain, tant les défis technologiques à lever restent nombreux. Pour les applications « *low-tech* » (vitrages intelligents, patchs colorimétriques, peintures thermo- ou photo-sensibles), l'intégration est plus immédiate, mais soulève des problématiques de tenue au vieillissement en conditions réelles (UV, intempéries, cycles chaud-froid), de recyclabilité et d'acceptabilité sociétale.

4) *Défis socio-économiques et de gouvernance de l'innovation.* La filière gagne à articuler recherche fondamentale, start-ups et partenaires industriels territoriaux, tout en s'appuyant sur des analyses de cycle de vie (ACV) réelles plutôt que sur de simples promesses de sobriété ou de conception écologique. En l'absence de métriques quantitatives partagées (énergie par bit, grammes $CO_{2\,eq}$ par m^2 de vitrage, coût par capteur, impact environnemental des ligands), le récit éthique risque de rester purement déclaratif. Cartographier ces verrous, les hiérarchiser et les traiter par le biais de programmes interdisciplinaires constitue, à nos yeux, un programme de recherche fertile pour les années à venir – et justifie pleinement des contributions ultérieures, plus spécialisées, dans la lignée du présent article.

Liste des abréviations

- CMOS : *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*
- CPU : *Central Processing Unit*
- GPU : *Graphics Processing Unit*
- IoT : *Internet of Things*
- LED : *Light-Emitting Diode*
- LIESST : *Light-Induced Excited Spin State Trapping*
- MOF : *Metal-Organic Framework*
- PCM : *Phase-Change Memory*

- RAM : *Random Access Memory*
- SCO : *Spin Crossover*
- SSD : *Solid-State Drive*

Références bibliographiques

ALCOTT B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54(1), 9-21.

ALI L. M., MATHLOUTHI E., CAHU M., SENE S., DAURAT M., LONG J., ... & GARY-BOBO M. (2020). Synergic effect of doxorubicin release and two-photon irradiation of Mn 2+-doped Prussian blue nanoparticles on cancer therapy. *RSC advances*, *10*(5), 2646-2649.

BELMOURI N. E. I., DI SCALA N. & BOUKHEDDADEN K. (2024). 3D self-organization of spin crossover multi-layers emerging from the alliance of elastic anisotropy and lattice frustration. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 190, 111985.

BOUKHEDDADEN K., SY M. & VARRET F. (2018). Emergence of dynamical dissipative structures in a bistable spin crossover solid under light: experience and theory. *Advanced Theory and Simulations*, *1*(9), 1800080.

BOUKHEDDADEN K., RITTI M. H., BOUCHEZ G., SY M., DÎRTU M. M., PARLIER M., ... & GARCIA Y. (2018). Quantitative contact pressure sensor based on spin crossover mechanism for civil security applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, *122*(14), 7597-7604.

BOUSSEKSOU A., MOLNÁR G., SALMON L. & NICOLAZZI W. (2011). Molecular spin crossover phenomenon: recent achievements and prospects. *Chemical Society Reviews*, 40(6), 3313-3335.

CAMBI L. & SZEGÖ L. (1931). Über die magnetische Suszeptibilität der komplexen Verbindungen. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 64(10), 2591-2598.

CHEN Y., HAN B., GOBBI M., HOU L. & SAMORÌ P. (2025). Responsive molecules for organic neuromorphic devices: Harnessing memory diversification. *Advanced Materials*, 37(19), 2418281.

COBO S., MOLNÁR G., REAL J. A. & BOUSSEKSOU A. (2006). Multilayer sequential assembly of thin films that display room-temperature spin crossover with hysteresis. *Angewandte Chemie International Edition*, 45(35), 5786–5789.

DARO N., MOULET L., PENIN N., PARADIS N., LÉTARD J. F., LEBRAUD E., ... & GUIONNEAU P. (2017). Spray-drying to get spin-crossover materials. *Materials*, 10(1), 60.

DECURTINS S., GÜTLICH P., KÖHLER C. P., SPIERING H. & HAUSER A. (1984). Light-induced excited spin state trapping in a transition-metal complex: The LIESST effect. *Chemical Physics Letters*, 105(1), 1-4.

DELAHAYE E., MOULIN R., AOUADI M., TRANNOY V., BEAUNIER P., FORNASIERI G. & BLEUZEN A. (2015). Co2+@ mesoporous silica monoliths: tailor-made

nanoreactors for confined soft chemistry. *Chemistry–A European Journal*, *21*(47), 16906-16916.

DI SCALA N., BELMOURI N. E. I, ESPEJO M. A. P. & BOUKHEDDADEN K. (2022). Three-dimensional electroelastic modeling of the nucleation and propagation of the spin domains in spin-crossover materials. *Physical Review B*, *106*(1), 014422.

DI SCALA N., BELMOURI N. E. I., SINGH Y. & BOUKHEDDADEN K. (2026). Theoretical Advances in Understanding the Physics of Core–Shell Spin Transition Nanoparticles. *2D and 3D Nanostructures*, 223-311.

ENRIQUEZ-CABRERA A., RAPAKOUSIOU A., BELLO M. P., MOLNÁR G., SALMON L. & BOUSSEKSOU A. (2020). Spin crossover polymer composites, polymers and related soft materials. *Coordination Chemistry Reviews*, 419, 213396.

European Commission. (2020). A Renovation Wave for Europe - Greening our buildings, creating jobs, improving lives (COM(2020) 662 final). Brussels.

European Commission. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report. European Commission.

GALLOIS B., REAL J. A., HAUW C. & ZAREMBOWITCH J. (1990). Structural changes associated with the spin transition in bis(isothiocyanato)bis(1,10-phenanthroline)iron(II): A single-crystal X-ray investigation. *Inorganic Chemistry*, 29(6), 1152-1158.

GÜTLICH P. & GOODWIN H. A. (2004). Spin Crossover in Transition Metal Compounds I-III. Springer Berlin Heidelberg.

HALDER G. J., KEPERT C. J., MOUBARAKI B., MURRAY K. S. & CASHION J. D. (2002). Guest-dependent spin crossover in a nanoporous molecular framework material. *Science*, 298(5599), 1762-1765.

International Data Corporation. (2022, mai). Worldwide Global DataSphere forecast, 2022–2026: Enterprise organizations driving most of the data growth (IDC #US49018922).

International Energy Agency (IEA). (2024). Electricity 2024 - Analysis and forecast to 2026. OECD Publishing.

KAHN O. (1993). Molecular Magnetism. VCH Publishers.

KAHN O. & MARTINEZ C. J. (1998). Spin-transition polymers: from molecular materials toward memory devices. *Science*, 279(5347), 44-48.

KÖNIG E. & MADEJA K. (1960). Equilibria in some Iron(II)-Complexes. *Chemical Communications*, 61.

KRÖBER J., CODJOVI E., KAHN O., GROLIÈRE F. & JAY C. (1993). A spin transition system with a thermal hysteresis at room temperature. *Journal of the American Chemical Society*, 115(21), 9810-9811.

LÉTARD J.-F., DARO N. & NGUYEN O. (2007). Nanoparticles of a spin transition compound (WO 2007/065996). World Intellectual Property Organization.

LORENC M., HÉBERT J., MOISAN N., TRZOP E., SERVOL M., BURON-LE COINTE M., ... & COLLET E. (2009). Successive dynamical steps of photoinduced switching

of a molecular Fe (III) spin-crossover material by time-resolved X-ray diffraction. *Physical review letters*, 103(2), 028301.

MEROLLA P. A., ARTHUR J. V., ALVAREZ-ICAZA R., CASSIDY A. S., SAWADA J., AKOPYAN F., JACKSON B. L., IMAM N., GUO C., NAKAMURA Y., BREZZO B., VO I., ESSER S. K., APPUSWAMY R., TABA B., AMIR A., FLICKNER M. D., RISK W. P., MANOHAR R. & MODHA D. S. (2014). A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface. *Science*, 345(6197), 668–673.

MILIN E., PATINEC V., TRIKI S., BENDEIF E.-E., PILLET S., MARCHIVIE M., CHASTANET G. & BOUKHEDDADEN K. (2016). Elastic frustration triggering photoinduced hidden hysteresis and multistability in a two-dimensional photoswitchable Hofmann-like spin-crossover metal-organic framework. *Inorganic Chemistry*, 55(22), 11652–11661.

MOLNÁR G., RAT S., SALMON L., NICOLAZZI W. & BOUSSEKSOU A. (2018). Spin crossover nanomaterials: from fundamental concepts to devices. *Advanced Materials*, 30(5), 1703862.

NDIAYE M. & BOUKHEDDADEN K. (2022). Pressure-induced multi-step and self-organized spin states in an electro-elastic model for spin-crossover solids. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *24*(21), 12870-12889.

NIGOGHOSSIAN K., BOUVET B., FÉLIX G., SENE S., COSTA L., MILHET P. E. ... & LARIONOVA J. (2022). Magneto-induced hyperthermia and temperature detection in single iron oxide core-silica/Tb3+/Eu3+ (acac) shell nano-objects. *Nanomaterials*, *12*(18), 3109.

PAEZ-ESPEJO M., SY M. & BOUKHEDDADEN K. (2016). Elastic frustration causing two-step and multistep transitions in spin-crossover solids: Emergence of complex antiferroelastic structures. *Journal of the American Chemical Society*, *138*(9), 3202-3210.

PIEDRAHITA-BELLO M., YANG X., ALAVI S. E., MOLNÁR G., SALMON L. & Bousseksou, A. (2023). Anisotropic spin-crossover composite actuators displaying pre-programmed movements. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 393, 134147.

PRINS F., MONRABAL-CAPILLA M., OSORIO E. A., CORONADO E. & VAN DER ZANT H. S. (2011). Room-temperature electrical addressing of a bistable spin-crossover molecular system. *Advanced Materials*, 23(13), 1545-1549.

SCHALLER R. R. (1997). Moore's law: Past, present and future. *IEEE Spectrum*, 34(6), 52–59.

SHEPHERD H. J., GURAL'SKIY I. A., SALMON L., MOLNÁR G. & BOUSSEKSOU A. (2013). Molecular actuators driven by cooperative spin-state switching. *Nature Communications*, 4, 2607.

SHUMILIN A., DEY S., COLTUNEAC D., STOLERIU L. & BALDOVÍ J. J. (2025). Switchable Magnonic Crystals Based on Spin Crossover/CrSBr Heterostructures. *arXiv preprint arXiv:2512.17003*.

SINGH Y., OUBOUCHOU H., NISHINO M., MIYASHITA S. & BOUKHEDDADEN K. (2020). Elastic-frustration-driven unusual magnetoelastic properties in a switchable core-shell spin-crossover nanostructure. *Physical Review B*, 101(5), 054105.

SLIMANI A. & BOUKHEDDADEN K. (2026). Numerical optimization of the physical properties of thermochromic layers based on spin transition materials for cold coating applications. *Materials & Design*, 115514.

SUN L., ROTARU A. & GARCIA Y. (2022). A non-porous Fe (II) complex for the colorimetric detection of hazardous gases and the monitoring of meat freshness. *Journal of hazardous materials*, 437, 129364.

SY M. (2016). Étude par microscopie optique des comportements spatio-temporels thermo- et photo-induits et de l'auto-organisation dans les monocristaux à transition de spin [Thèse de doctorat, Université Paris Saclay].

TURING A. (1952). The chemical basis of morphogenesis (1952). B Jack Copeland, 519.

United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2025). Harnessing the potential of critical minerals for sustainable development.

WANG Q., HUANG N., CHEN Z., CHEN X., CAI H. & WU Y. (2023). Environmental data and facts in the semiconductor manufacturing industry: An unexpected high water and energy consumption situation. *Water Cycle*, 4, 47-54.

XIAO X., CHEN Z. J., VARLEY R. J. & LI C. H. (2024). Smart bistable coordination complexes. *Smart Molecules*, 2(2), e20230028.

5 ÉTUDE DE CAS

Le campus « Industrie Circulaire de la Mobilité » (ICM) : catalyseur de la transition automobile et des compétences de demain

Sylvie DUGENEST

Groupe Renault
Campus d'Excellence de l'Industrie Circulaire de la Mobilité



Sébastien CHARLES
Maître de conférences en Mécanique
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles
UVSQ – IUT de Mantes-en-Yvelines
LISV

Résumé

Cette étude de cas examine le rôle de l'économie circulaire comme levier de transformation industrielle, en mettant l'accent sur la dimension souvent sous-estimée des compétences et des dynamiques humaines. Il s'inscrit dans une problématique centrale : dans quelle mesure la réussite et le passage à l'échelle des modèles circulaires dépendent-ils de l'intégration des enjeux de formation, de métiers et de gouvernance territoriale, au-delà des seules optimisations techniques et matérielles ? Pour y répondre, l'étude mobilise une méthodologie qualitative fondée sur l'analyse d'un cas emblématique, celui de la transformation du site industriel de Flins à travers le projet Refactory, complétée par l'examen du dispositif partenarial du Campus des Métiers et des Qualifications de l'Industrie Circulaire de la Mobilité. Les résultats montrent que, si l'économie circulaire offre des perspectives significatives en matière de création de valeur, d'emplois et de résilience industrielle, sa mise en œuvre à grande échelle reste conditionnée par la capacité à structurer des écosystèmes de compétences adaptés, à accompagner les transformations organisationnelles et à développer des formes de gouvernance multi-acteurs ancrées dans les territoires. L'étude de cas met ainsi en évidence la nécessité de considérer les compétences comme un levier stratégique central des transitions industrielles et écologiques.

Mots-clés

Économie circulaire - réindustrialisation - compétences - cas industriel emblématique.

Introduction

L'intensification des activités industrielles depuis le début de l'ère moderne s'est accompagnée d'une mobilisation croissante des ressources naturelles, conduisant progressivement à des tensions environnementales, énergétiques et économiques. Ce modèle de développement, historiquement fondé sur une logique linéaire — extraire, produire, consommer, éliminer — montre aujourd'hui ses limites face à la raréfaction des ressources, à l'augmentation des déchets et aux impératifs de réduction des impacts environnementaux. Dans ce contexte, l'économie circulaire s'est imposée comme un cadre de référence visant à concilier performance économique et soutenabilité, en promouvant la fermeture des cycles de matières et d'énergie, l'allongement de la durée de vie des produits et le développement de nouveaux modèles d'affaires.

Au-delà de ses promesses écologiques, l'économie circulaire constitue également un levier stratégique de transformation industrielle et de création de valeur. Elle favorise l'émergence d'activités à forte intensité de main-d'œuvre, telles que la réparation, le reconditionnement ou le recyclage, tout en stimulant l'innovation organisationnelle et technologique. Toutefois, si les dimensions techniques et matérielles de la circularité ont fait l'objet de nombreux travaux et expérimentations, la question des compétences et de l'accompagnement des transformations humaines reste encore insuffisamment intégrée dans les stratégies de déploiement.

Le secteur automobile illustre particulièrement ces dynamiques. Confronté à des mutations profondes — transition énergétique, évolution des usages, contraction des volumes de production — il constitue un terrain d'analyse privilégié pour observer les recompositions industrielles à l'œuvre. Dans ce contexte, l'économie circulaire apparaît non seulement comme une opportunité de renouvellement des modèles productifs, mais également comme un défi en matière d'adaptation des métiers et des systèmes de formation.

Cette étude de cas propose d'analyser ces enjeux à partir d'un cas d'étude emblématique : la transformation du site industriel de Flins à travers le projet Refactory, ainsi que le

développement concomitant d'un écosystème territorial de formation structuré autour d'un Campus des Métiers et des Qualifications dédié à l'industrie circulaire de la mobilité. En mobilisant cette étude, il s'agit d'évaluer dans quelle mesure l'intégration des compétences comme levier stratégique conditionne la réussite, la pérennité et la possible transposabilité des modèles d'économie circulaire à l'échelle industrielle et territoriale.

1. L'économie circulaire : un levier de développement

Depuis le début de l'ère industrielle, amorcée au milieu du XVIIIe siècle, la production industrielle a connu une croissance continue afin de satisfaire la demande croissante en biens de consommation d'une population en constante augmentation. Cette expansion s'est traduite par une intensification progressive de l'exploitation des ressources naturelles, qu'elles soient matérielles ou énergétiques, dont une grande partie est non renouvelable.

Historiquement, cette dynamique s'est inscrite dans un modèle d'économie linéaire reposant sur la succession « extraire – produire – consommer – éliminer », privilégié pour son efficacité en matière de procédés industriels et pour la rapidité de la rentabilité économique qu'il permet. À ce système s'ajoutent les activités de soutien ou associées à la production industrielle, telles que la logistique et la distribution, qui mobilisent elles aussi des volumes importants de ressources.

Face aux limites écologiques et matérielles de ce modèle, des travaux en économie des ressources et en écologie industrielle ont, dès les années soixante et soixante-dix, commencé à proposer des approches alternatives visant à refermer les cycles de matière et d'énergie. Ces réflexions théoriques ont progressivement conduit à l'émergence du concept d'économie circulaire, dont l'objectif est d'optimiser l'utilisation des ressources, de réduire la production de déchets et de favoriser la réintégration des flux de matières dans les systèmes de production (BOULDING, 1966 ; FROSCH & GALLOPOULOS, 1989 ; GHISELLINI et al., 2016).

L'économie circulaire (EC) s'est imposée au cours des dernières décennies comme un cadre théorique et opérationnel visant à remplacer le modèle économique linéaire fondé sur une exploitation irréversible des ressources. Ce modèle alternatif vise à maintenir la valeur des produits, matériaux et ressources dans l'économie le plus longtemps possible, tout en réduisant la production de déchets et la dépendance aux ressources naturelles. L'économie circulaire propose la réduction de l'utilisation des ressources, la réutilisation, le recyclage et la récupération des matériaux au sein de systèmes économiques multi-niveaux (micro, méso et macro).

Les racines conceptuelles de l'économie circulaire remontent notamment aux travaux de Walter R. STAHEL, qui introduit dès les années quatre-vingt l'idée d'une « économie en boucle » fondée sur l'extension de la durée de vie des produits et la valorisation des activités de réparation, de reconditionnement ou de réemploi (STAHEL 2016, WINANS et al. 2017).

Aujourd'hui, l'économie circulaire est généralement considérée comme un cadre multidisciplinaire, mobilisant entre autres l'analyse du cycle de vie pour mesurer efficacement les impacts, l'écoconception des produits et process, l'écologie industrielle et territoriale, l'économie des ressources et des fonctionnalités et la gestion des chaînes d'approvisionnement en boucles courtes.

Le potentiel écologique et économique de la mise en œuvre de stratégie d'économie circulaire est immense. Sur le plan écologique, selon le rapport Circularity Gap Report de l'organisation Circle Economy, les stratégies d'économie circulaire appliquées à ces secteurs pourraient réduire les émissions mondiales d'environ 39 % (The Circularity Gap Record 2023). Sur le volet économique, une étude de la Fondation Ellen MacArthur et McKinsey estime que l'économie circulaire pourrait générer jusqu'à 4 500 milliards de dollars de valeur économique mondiale d'ici 2030, grâce à la réduction des coûts de matières premières et à la création de nouveaux modèles économiques (Fondation Ellen MacArthur 2021). En Europe, l'adoption de stratégies circulaires pourrait produire jusqu'à 1 800 milliards d'euros de bénéfices économiques par an d'ici 2030, incluant : 600 milliards d'euros d'économie sur les ressources, 1 200 milliards d'euros de bénéfices économiques indirects en innovation et en externalités positives (MCKINSEY 2015).

L'un des principaux arguments économiques en faveur de l'économie circulaire concerne l'amélioration de l'efficacité dans l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques.

En effet, les stratégies circulaires de réemploi, réparation, reconditionnement et recyclage permettent de réduire les coûts liés à l'extraction de matières premières, de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la productivité matérielle des systèmes économiques.

GHISELLINI et al. (2016) montrent que la mise en œuvre de stratégies circulaires peut contribuer à un découplage partiel entre croissance économique et consommation de ressources, en favorisant des cycles de matières fermés et des modèles de production plus efficaces.

Plus récemment, des analyses de flux de matières à l'échelle mondiale indiquent que l'économie globale reste encore largement linéaire : environ 9 % seulement des flux matériels seraient actuellement recyclés, ce qui suggère un potentiel considérable d'amélioration économique et environnementale.

En pratique, la création de valeur économique provient principalement de trois mécanismes : la réduction des coûts d'approvisionnement en matières premières et de la facture énergétique, la valorisation des déchets comme ressources alternative et le développement de nouveaux marchés liés aux activités de réparation, de maintenance et de recyclage. À cela s'ajoute l'amélioration de l'image de l'entreprise qui s'implique dans cette dynamique respectueuse de l'environnement, qui a généralement un impact positif sur les ventes des produits et services.

L'économie circulaire stimule également l'émergence de nouveaux modèles d'affaires, souvent regroupés sous l'appellation de circular business models. Les plus fréquents sont l'économie de la fonctionnalité (*product-as-a-service*), la « remanufacturation » ou autrement dit la remise en état des produits par des activités « artisanales », les systèmes de reprise et de reconditionnement, les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée (*closed-loop supply chains*).

Les travaux de BOCKEN et al. (2016) et GEISSDOERFER et al. (2017) montrent que ces modèles permettent de générer des revenus récurrents tout en réduisant les flux de matières et d'énergie, ce qui améliore simultanément les performances économiques et environnementales des entreprises.

De plus, les technologies numériques — notamment l'intelligence artificielle, la traçabilité numérique ou la blockchain — sont identifiées comme des facilitateurs majeurs de la

circularité en améliorant la gestion des flux de matières et la transparence des chaînes d'approvisionnement.

Enfin, les activités circulaires — telles que la réparation, la maintenance ou la remanufacturation — sont plus intensives en main-d'œuvre que l'extraction ou la production primaire, ce qui peut entraîner une création nette d'emplois dans certains secteurs ou du moins son maintien dans un contexte économique peu propice.

Cependant, bien que l'efficacité de ces modèles ait été démontrée à de nombreuses reprises, sa mise en œuvre peut s'avérer complexe. En effet, la maîtrise des flux de matières d'œuvre, composants ou produits de seconde vie, en veillant à toujours en disposer au bon moment, en qualité et quantité suffisantes, est parfois difficile à garantir, ce qui peut entraîner des fluctuations indésirables de production. Par ailleurs, du point de vue financier, les activités d'économie circulaire nécessitent souvent le déploiement de modèles économiques particuliers qui requiert parfois de disposer d'une réserve de fonds suffisante pour lancer les activités, notamment pour les systèmes basés sur des modèles locatifs de produits dont on garantit l'entretien sur la durée. À cela s'ajoute la maîtrise d'une forte diversification des produits, notamment pour le reconditionnement qui propose généralement des services sur les produits issus de la concurrence pour garantir une activité suffisante. Sans compter que ceci a généralement un impact sur les surfaces et l'immobilisation des stocks pour garantir des flux de ressources des process de production.

À l'échelle macroéconomique, l'économie circulaire pourrait contribuer à la diversification industrielle des produits et services, la résilience des systèmes économiques face aux pénuries de ressources et aux imprévus géopolitiques, la création d'emplois dans les secteurs de maintenance et de recyclage et la relocalisation des activités industrielles sur le territoire national.

Toutefois, les effets macroéconomiques positifs restent dépendants des politiques publiques, des innovations technologiques et des changements de comportements de consommation. Ce dernier point est d'ailleurs un des leviers qu'il faut impérativement déployer conjointement aux activités d'industrie circulaire. En effet, il faut convaincre d'une part ses clients des vertus de la démarche et, d'autre part, l'ensemble des collaborateurs de l'entreprise pour garantir leur adhésion et leur implication dans ce changement de paradigme ; on parle alors de changement de « mindset ».

De plus, le concept d'économie circulaire reste interprété de multiples façons (HOMRICH et al. 2018, KIRCHHERR et al. 2017, MURRAY et al. 2017, MORAGA et al. 2019, LIEDER et al. 2016), ce qui peut compliquer sa mise en œuvre et son évaluation notamment par le biais de l'analyse de cycle de vie qui peut être réalisée selon de nombreuses méthodes divergentes et s'appuyant sur des bases de données variables. Il faut également se mettre en garde contre des effets rebond : d'abord, l'amélioration de l'efficacité des ressources pourrait être compensée par une augmentation globale de la production ou de la consommation. Ensuite, elle peut entraîner une focalisation excessive sur le recyclage ou le réemploi au détriment de stratégies plus efficaces comme la réduction de la consommation ou l'allongement de la durée de vie des produits (KORHONEN et al. 2018).

Dans la suite de cette étude de cas, nous allons présenter un cas d'application des principes de l'économie circulaire dans la filière automobile et analyser les vertus et limites du dispositif.

2. L'économie circulaire, un second souffle pour l'industrie automobile

La filière automobile française connaît depuis plusieurs années une phase de mutation profonde liée notamment à la croissance du marché de l'occasion. En effet, en 2024, les ventes de véhicules neufs ont diminué de 3,2 %, avec environ 1,7 million d'immatriculations, un niveau nettement inférieur à celui observé avant la crise sanitaire. Cette tendance s'est poursuivie en 2025 avec environ 1,63 million, soit environ –5 % par rapport à 2024.

Plusieurs facteurs contribuent à ce recul, parmi lesquels les incertitudes économiques et politiques, la diminution des dispositifs de soutien à l'achat de véhicules propres, ainsi qu'un marché des véhicules électriques qui ne parvient toujours pas à percer. Après plusieurs années de croissance soutenue, leurs ventes ont d'ailleurs enregistré un recul de 2,2 % en 2024 (AFP, 2025).

En matière d'emploi, selon les projections de la Plateforme Française de l'Automobile (PFA, 2025), la filière pourrait perdre plus d'un cinquième de ses effectifs à l'horizon 2035, ce qui représenterait près de 75 000 emplois industriels. Cette évolution s'explique principalement par la diminution de la production de véhicules neufs sur le territoire national, par l'augmentation de l'automatisation dans les chaînes de production et par une transition vers l'électromobilité qui ne génère pas encore un volume d'emplois suffisant pour compenser ces pertes.

Ainsi, le secteur automobile traverse actuellement une période de transition industrielle caractérisée par des besoins en main-d'œuvre inférieurs à ceux associés à la production de véhicules thermiques.

Bien que les besoins en main-d'œuvre sur les lignes de production automobile en France aient diminué, notamment sous l'effet de l'automatisation accrue et de certaines délocalisations industrielles, les activités liées à la réparation, au remanufacturage, au reconditionnement, au démontage et au recyclage ont connu, à l'inverse, une forte progression ces dernières années. Ces activités relevant de l'économie circulaire constituent une opportunité importante pour repenser les modèles industriels et favoriser la création d'emplois durables. Elles génèrent des besoins non seulement au niveau opérationnel, mais également au sein des fonctions de décision et de support, par exemple dans les domaines de l'éco-conception, de l'éco-logistique ou encore de la finance verte. En Europe, les activités liées à la circularité pourraient générer 700 000 emplois supplémentaires d'ici 2030, à condition d'investir dans la formation et la reconversion des salariés à l'évolution inéluctable du produit automobile et des usages en matière de mobilité.

En France, l'ADEME estime que les emplois associés à l'économie circulaire, tant manuels qu'intellectuels, connaissent une croissance soutenue. Souvent fondés sur des activités manuelles et organisés autour de circuits logistiques courts, ces métiers sont moins exposés aux risques de délocalisation que ceux de l'industrie de production classique. Ils constituent ainsi un levier important pour préserver l'emploi local et générer de la valeur ajoutée au sein des territoires.

Malgré ces études un constat demeure, presque un paradoxe : l'économie circulaire s'est progressivement imposée comme un référentiel structurant dans de nombreux secteurs industriels, mais sa mise en œuvre reste encore largement centrée sur les flux matériels, logistiques et énergétiques. Les entreprises ont, pour beaucoup, développé des compétences avancées en matière d'optimisation des matières premières, de réduction des déchets, de réemploi ou de symbioses industrielles. Les travaux sur les industrial ecosystems

(CHERTOW, 2007 ; EHRENFELD & GERTLER, 1997) montrent d'ailleurs que ces dynamiques sont désormais bien ancrées dans plusieurs territoires, où les acteurs économiques ont appris à coopérer pour améliorer la circularité de leurs processus. Toutefois, cette focalisation sur les flux techniques tend à occulter un volet pourtant déterminant : la dimension humaine. Dans la plupart des démarches d'économie circulaire, la question des compétences, des métiers, des trajectoires professionnelles ou de la conduite du changement est rarement considérée comme un levier stratégique. Or, sans une prise en compte explicite de ces enjeux, le passage à l'échelle des modèles circulaires demeure limité. Les organisations peuvent optimiser leurs flux, mais si les salariés ne sont pas formés, si les métiers ne sont pas adaptés, si les collectifs de travail ne sont pas accompagnés, les innovations circulaires restent confinées à des expérimentations locales ou à des niches organisationnelles.

L'exemple des démarches d'Écologie Industrielle et Territoriale (EIT) dans le Nord de la France illustre bien cette tension. Les projets menés dans ce territoire — souvent cités comme pionniers en matière de symbiose industrielle — ont permis de structurer des coopérations inter-entreprises autour du partage de ressources, de la mutualisation logistique ou de la valorisation de co-produits. Pourtant, plusieurs évaluations soulignent que les besoins en compétences liés à la circularité sont rarement anticipés, les métiers évoluent sans être formalisés et les dispositifs de formation ne sont pas toujours alignés avec les transformations organisationnelles induites par l'EIT. Cette situation reflète une tendance plus générale : l'économie circulaire est souvent pensée comme un problème technique, alors qu'elle constitue avant tout une transformation socio-organisationnelle. Pour que les modèles circulaires puissent être déployés à grande échelle, il est indispensable de reconnaître que les compétences — qu'il s'agisse de maintenance circulaire, de logistique inversée, de gestion des flux complexes ou de coordination inter-entreprises — sont au cœur de la réussite. Autrement dit, la circularité ne peut devenir systémique que si elle s'accompagne d'une véritable stratégie de développement des compétences, articulée à l'échelle territoriale et intégrée dans les dispositifs de gouvernance des projets.

Un exemple intéressant à observer dans ce cadre de réflexion est celui de ReFactory, projet inédit du groupe Renault en 2020 lancé pour transformer l'activité de son usine de Flins (78) en économie circulaire.

Ce projet de transformation, désormais achevé, représente un pari unique en Europe : en seulement quatre ans, le site a transformé une usine traditionnelle de production de véhicules neufs en un pôle de référence industrielle en économie circulaire, tout en préservant les 2 000 emplois existants. Cette ambition s'est fondée sur le constat que la chute des ventes de véhicules neufs était compensée par une forte augmentation des ventes des véhicules d'occasion. L'objectif a donc été de lancer une activité à l'échelle industrielle de reconditionnement de véhicules, accompagnée d'autres activités de réparation, recyclage, réemploi, démantèlement, pour s'inscrire en pionnier dans un contexte où l'économie circulaire est devenue un levier stratégique pour concilier transition écologique et préservation des emplois.

Cette transformation d'activité s'est doublée d'un objectif majeur en termes d'innovation sociale : le maintien de l'ensemble des emplois sur le site. Il a donc fallu mettre en place un plan solide d'accompagnement des salariés afin de développer pour chacun les compétences requises par les nouvelles activités. Au total, les 2 000 personnes composant les effectifs du

site, ainsi qu'une partie de la force de travail intérimaire, ont été formées à l'économie circulaire, dont 75 % d'opérateurs.

Les compétences nouvelles pour le site (une usine de carrosserie et montage de véhicules neufs) mais existantes dans les métiers du groupe étaient majoritairement celles de la fin de vie du véhicule, c'est-à-dire celles :

• du prolongement de la vie des véhicules : rénovation, réparation. Ici, les métiers sont des connus du secteur automobile, tels que mécanicien auto, carrossier, peintre ;

• de la fin de vie des véhicules : démantèlement sans abîmer en préservant le plus de matière/composants/pièces possible afin de remettre à neuf, réemployer, recycler, ne jeter que le strict nécessaire, le plus tard possible dans le cycle de vie afin de récupérer de la valeur et l'intégrer dans la chaîne de valeur globale.

Ces compétences bien qu'existantes sur le marché ne suffisent pas aujourd'hui pour assurer la transformation à l'échelle du secteur automobile. Et c'est le constat que nous avons dressé en l'expérimentant au sein de ReFactory. Et ce, pour plusieurs raisons :

• d'abord parce que ce sont des compétences éparses sur le territoire et travaillant majoritairement dans de petites voire très petites structures (garages, centres de tri…) ;

• ensuite parce que ces compétences sont déjà déficitaires en nombre pour servir les besoins actuels, croissants, du marché ;

• enfin, et nous évoquons ici de nouveaux métiers avec des besoins spécifiques propres, passer ces compétences des métiers traditionnels à une échelle industrielle suppose une adaptation telle que l'on peut parler de nouveaux métiers : la standardisation, la cadence, l'adaptation à traiter des pièces ou véhicules qui ne sont plus tous identiques car tout produit usagé est différent, implique pour les métiers techniques et opérationnels non seulement des formations métier mais aussi la formation en soft skills.

Au-delà du développement de compétences opérationnelles, la transition a également conduit à repenser l'ensemble des compétences associées aux fonctions supports de la production et de toute la chaîne de valeur d'une organisation. Au niveau des instances décisionnelles des entreprises, il a notamment été nécessaire de développer des capacités d'analyse et de modélisation permettant de formaliser, structurer et comparer différentes alternatives de chaînes de valeur intégrant à la fois des dimensions économiques et environnementales. L'évolution des modèles d'affaires et leur maîtrise par les métiers du contrôle de gestion notamment est indispensable au passage à l'échelle de nouveaux modèles industriels en économie circulaire.

Dans les bureaux d'études, cette évolution s'est traduite par l'intégration de compétences en éco-conception, afin de concevoir des produits en tenant compte de l'ensemble de leur cycle de vie — depuis leur fabrication et leur utilisation jusqu'à leur seconde vie et leur fin de vie.

Au sein des bureaux des méthodes, de nouvelles compétences ont émergé autour de l'utilisation de l'impression 3D comme levier d'amélioration et de maintenance des moyens de production. Les services financiers ont, quant à eux, été amenés à intégrer des compétences en finance verte et en contrôle de gestion orienté vers les objectifs de l'économie circulaire.

Dans les services achats, l'évolution des pratiques a nécessité l'acquisition de compétences permettant d'intégrer plus systématiquement les critères environnementaux dans les processus de décision, traditionnellement centrés sur des considérations de coût financier.

Enfin, les fonctions logistiques ont dû développer des approches adaptées au raisonnement en boucle courte, en lien avec les principes de l'écologie industrielle et territoriale.

3. La région Île-de-France, la région académique et l'État : des soutiens indispensables

La région Île-de-France et l'État, via les ministères en charge de l'Économie, de l'Industrie et du Travail, ont joué un rôle déterminant dans la réussite du projet ReFactory. Leur soutien s'est matérialisé de plusieurs manières.

Un financement majeur

Tout d'abord, un financement substantiel de l'État (France 2030) a été apporté, avec 7 millions d'euros via l'Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI) CMA, ainsi qu'une subvention annuelle de 50 000 euros de la part de la Région. Ensuite, une coordination renforcée a été mise en place pour mettre en réseau les acteurs locaux, qu'il s'agisse d'entreprises, de centres de formation ou de collectivités. Enfin, un cadre réglementaire favorable a été instauré pour soutenir l'innovation pédagogique et la reconversion des compétences, en ligne avec les recommandations de la Commission européenne en 2023.

Une structure de portage : le campus des métiers et des qualifications dédiées aux métiers de la mobilité en économie circulaire

L'offre de formation a été intégrée au sein du Campus Industrie Circulaire de la Mobilité, labellisé campus des métiers et des qualifications d'excellence. Ce dispositif porté par l'État permet au sein du campus de réunir partenaires privés et publics pour construire une offre de formation destinée à un large public : depuis le lycée jusqu'au master, incluant les grandes écoles.

Le Campus des Métiers et des Qualifications de l'Industrie Circulaire de la Mobilité (CMQ ICM) a été conçu et mis en place selon un schéma partenarial unique, pour accompagner les salariés, les élèves et les étudiants de tout niveau et de tout horizon vers les métiers de l'économie circulaire.

Il regroupe un écosystème de partenaires privés (Renault, NextMove, la PFA), académiques (Université de Versailles Saint Quentin, Paris Saclay, Région Académique d'Île-de-France) et institutionnels (région Île-de-France, Seinergylab).

Le CMQ ICM œuvre à la sensibilisation et à l'orientation vers les métiers émergents de l'économie circulaire, à la coloration de formations et à la création de nouveaux modules et cursus complets sur les thèmes de ce changement de paradigme industriel. Ses formations couvrent un large éventail de domaines, en phase avec les besoins de l'industrie locale, et sont dispensées selon des approches pédagogiques modernes. Les formations proposées s'appuient sur les approches expérientielles de la pédagogie active, participative et ludique. Ainsi, le campus propose des jeux sérieux, des jeux de rôle, des jeux de plateaux, des fresques et des études de cas dynamiques.

Sur l'impulsion des besoins métiers issus de Refactory ainsi que des autres membres du campus, le Campus ICM a mis en place des formations sur tous les volets de l'économie circulaire.

Ainsi, dans le domaine de la rénovation et réparation de véhicules, a été créé un certificat de qualification professionnelle (CQP) Carrossier débosselage sans peinture, ou encore des modules spécialisés sur la réparation d'optiques, la réparation de plastiques extérieurs et la réparation de jantes. Pour les techniciens, un parcours diagnostic en carrosserie, mécanique et ADAS2 est également disponible. Autant de métiers qui correspondent aux métiers émergents dans l'industrie automobile circulaire.

Pour le démantèlement et la valorisation des matériaux, le Campus ICM permet aux salariés, aux enseignants, aux formateurs, de se former aux fondamentaux des matériaux, au tri et au recyclage des déchets industriels.

Ces formations sont essentielles pour accompagner la transition vers une économie circulaire, où la gestion des déchets et des matériaux devient un enjeu clé.

Les modèles d'économie circulaire étant systémiques, il s'agit d'adresser l'ensemble des compétences d'une organisation. Dans le domaine tertiaire et des fonctions support, le Campus ICM monte donc, avec ses partenaires, des modules axés sur l'économie circulaire pour les acheteurs et vendeurs, les contrôleurs de gestion, les techniciens et ingénieurs de bureau d'études et de méthode, notamment pour l'éco-conception et l'Analyse du Cycle de Vie, et en matière de stratégie d'entreprise et de chaîne de valeur pour les décisionnaires et gestionnaires. Ces formations permettent à tous les publics qu'il vise, de l'opérateur au manager, selon des contenus contextualisés, de comprendre les enjeux de la circularité et d'intégrer ces principes dans leur travail quotidien, qu'il s'agisse de vente, de logistique ou de gestion.

Enfin, pour les véhicules électriques et leur écosystème, le campus développe des formations sur l'écosystème des véhicules électriques, sur les fondamentaux des batteries et cellules et sur leur usage en seconde vie, ou encore au diagnostic, à la réparation et à la seconde vie des bornes de recharge.

Chiffres clés du campus :

• 3 500 personnes formées en deux ans, incluant salariés, élèves, étudiants et professionnels en reconversion, en format présentiel au campus de Flins ou en établissement sur le territoire, pour un objectif de 8 000 personnes visées d'ici 2028.

• Plus de 15 000 personnes sensibilisées à l'économie circulaire en menant de nombreuses actions envers tous les publics.

Ce modèle de campus et son fonctionnement sont intéressants à mettre en perspective : la montée en puissance des politiques de compétences à l'échelle territoriale constitue un phénomène marquant de la transformation de l'action publique. Alors que les compétences étaient historiquement pensées comme relevant principalement des organisations — entreprises, établissements de formation, administrations — on observe depuis une quinzaine d'années un mouvement de territorialisation qui vise à articuler les besoins, les ressources et les stratégies à l'échelle d'un bassin d'emploi ou d'un écosystème local. Cette évolution s'inscrit dans un cadre plus large de recomposition des modes de gouvernance, marqué par l'essor de l'action publique partenariale, la montée des logiques de coordination horizontale et la reconnaissance du rôle structurant des territoires dans la production de compétences.

Ici, le modèle de Campus des Métiers et des Qualifications, en particulier celui de l'exemple cité, Industrie Circulaire de la Mobilité, apparaît comme un dispositif emblématique de cette

dynamique. Il repose sur une vision territoriale des compétences, qui considère que la formation, l'attractivité des métiers, la montée en qualification et l'innovation pédagogique ne peuvent être pensées isolément, mais doivent être co-construites avec l'ensemble des acteurs du territoire. Cette approche rejoint les travaux sur les learning regions (DOLOWITZ et MARSH 2002), qui soulignent que la capacité d'un territoire à se développer dépend de sa faculté à organiser des interactions denses entre entreprises, institutions éducatives, collectivités et acteurs intermédiaires. Le campus s'inscrit ainsi dans une logique d'écosystème, où les compétences deviennent un bien collectif, produit par la coopération plutôt que par la seule juxtaposition d'initiatives individuelles.

Le modèle partenarial sur lequel repose le campus est tout à fait novateur. Il mobilise des organisations très différentes dont les modes de fonctionnement le sont tout autant. Certaines disposent d'une longue expérience de projets collaboratifs, d'autres découvrent encore les logiques de gouvernance partagée ou les mécanismes de mutualisation. Cette hétérogénéité constitue à la fois une richesse — car elle permet de croiser des cultures professionnelles variées — et une difficulté opérationnelle majeure. Les travaux sur les partenariats territoriaux (PASQUIER et al. 2007, ARAMBOUROU et al. 2021) montrent en effet que la réussite de tels dispositifs dépend de la capacité des acteurs à construire des référentiels communs, à stabiliser des routines de coopération et à dépasser les asymétries de ressources, de légitimité ou de temporalités.

Un tel constat peut interroger la pérennité du modèle. Sa durabilité dépendra de plusieurs facteurs : la consolidation des mécanismes de gouvernance, non seulement la capacité à maintenir l'engagement des partenaires, la stabilisation des financements, mais aussi la faculté du campus à démontrer sa valeur ajoutée territoriale. Les travaux sur les politiques territoriales de compétences montrent que les dispositifs innovants sont souvent fragiles, car ils reposent sur des configurations locales spécifiques, sur des leaders institutionnels engagés ou sur des fenêtres d'opportunité politiques. La question est donc de savoir si le campus peut s'inscrire dans le temps long ou s'il risque de rester un objet institutionnel transitoire, dépendant de conditions locales favorables. Sa pérennité dépend également comme toute organisation humaine des équipes qui le composent, des personnes elles-mêmes qui parviennent à dépasser les schémas de leurs propres organisations pour travailler ensemble à un but commun. L'expérience managériale sur ce plan-là est également révélatrice d'une période de transition, d'un besoin continu de donner du sens pour fédérer.

Un autre point important concerne la question de la transposabilité du modèle partenarial. Certains principes semblent généralisables : la mutualisation des ressources, la co-construction des parcours, l'ancrage territorial, la gouvernance multi-acteurs. Toutefois, la littérature sur les transferts de politiques publiques (ASHEIM, 2012) rappelle que la réussite d'un modèle dans un territoire ne garantit pas son efficacité ailleurs. Les configurations locales — relations inter-acteurs, histoire institutionnelle, culture de coopération, densité économique — jouent un rôle déterminant. Le campus apparaît ainsi comme un laboratoire institutionnel, dont les enseignements peuvent inspirer d'autres territoires, mais dont la reproduction mécanique serait illusoire.

Enfin, ce modèle partenarial innovant invite à repenser les catégories classiques de l'action publique en matière de formation et de compétences. Il montre que les réponses aux besoins de compétences ne peuvent plus être conçues uniquement à partir des systèmes éducatifs ou des politiques de l'emploi, mais doivent intégrer des logiques d'écosystèmes territoriaux, de

gouvernance distribuée et d'innovation collaborative. En ce sens, le campus contribue à renouveler les modes de production des compétences, en articulant des acteurs aux rationalités différentes autour d'un projet commun et en expérimentant des formes de coopération qui pourraient préfigurer les politiques publiques de demain.

4. Ouverture prospective (2030–2040)

À l'horizon 2030-2040, les transformations engagées aujourd'hui laissent entrevoir un basculement profond dans la manière dont les territoires, les entreprises et les institutions publiques penseront les compétences et les modèles de coopération. Les transitions écologique, numérique et industrielle convergent désormais, produisant des effets systémiques qui dépassent largement les cadres sectoriels traditionnels. Dans ce contexte, les dispositifs tels que les campus territoriaux pourraient devenir des architectures centrales de la gouvernance des compétences, non plus comme des expérimentations isolées, mais comme des infrastructures stratégiques capables d'orchestrer des écosystèmes complexes.

Plusieurs tendances se dessinent déjà. D'abord, la montée en puissance des technologies d'automatisation, de simulation et d'intelligence artificielle va profondément transformer les métiers industriels, en créant de nouveaux besoins de compétences hybrides, à la frontière entre ingénierie, data, maintenance avancée et coordination inter-organisationnelle. Les territoires devront être capables d'anticiper ces évolutions, de cartographier les compétences émergentes et de structurer des parcours de formation beaucoup plus agiles, modulaires et interopérables. Les campus pourraient devenir des plateformes d'anticipation, capables de relier en temps réel les besoins des entreprises, les capacités des organismes de formation et les trajectoires professionnelles des individus.

Ensuite, l'économie circulaire, aujourd'hui encore en phase de structuration, pourrait entrer dans une logique de massification. Les symbioses industrielles, les chaînes de valeur circulaires et les modèles de production bas carbone seront non plus des niches, mais des standards. Cette évolution exigera une montée en compétences sans précédent : facilitateurs de symbioses, ingénieurs de circularité, logisticiens de flux inversés, opérateurs de réemploi, coordinateurs territoriaux. Les territoires qui réussiront seront ceux capables de considérer les compétences non comme un simple accompagnement technique, mais comme un levier stratégique de transformation systémique. L'enjeu ne sera plus seulement de former, mais aussi de créer des environnements d'apprentissage continus, intégrés aux dynamiques industrielles et territoriales.

Par ailleurs, les modèles partenariaux devront évoluer vers des formes de gouvernance plus distribuées, plus adaptatives et plus résilientes. Les organisations ne pourront plus fonctionner en silos : la complexité des transitions exigera des capacités de coopération renforcées, des mécanismes de confiance institutionnalisés et des dispositifs de pilotage capables d'articuler des temporalités multiples. Les campus pourraient devenir des tiers-lieux institutionnels, jouant un rôle de médiation, de traduction et de coordination entre acteurs aux rationalités différentes. Leur pérennité dépendra de leur capacité à incarner cette fonction d'interface, à la fois neutre, agile et stratégiquement positionnée.

Enfin, une question centrale se posera : comment garantir l'inclusion dans un contexte de transitions rapides et parfois déstabilisantes ? Les territoires devront éviter que les transformations industrielles et écologiques creusent les inégalités de compétences. Les campus, en tant qu'espaces de coopération territoriale, pourraient devenir des leviers d'équité

professionnelle, en facilitant l'accès à la formation, en accompagnant les reconversions et en soutenant les publics les plus éloignés des dynamiques d'innovation.

Ainsi, les perspectives ouvertes par cette étude invitent à considérer les campus non seulement comme des dispositifs de formation ou de coordination, mais comme des infrastructures territoriales de transition, capables de soutenir les mutations industrielles, d'anticiper les besoins en compétences et de structurer des coopérations durables. Leur avenir dépendra de leur capacité à se positionner au cœur des transformations systémiques à venir, en articulant innovation, ancrage territorial et reconnaissance du facteur humain comme moteur essentiel des transitions.

Conclusion

L'analyse croisée de Refactory et du campus met en évidence non seulement la puissance, mais aussi une forme de fragilité des modèles partenariaux territoriaux lorsqu'ils cherchent à accompagner des transformations industrielles et écologiques d'ampleur. Dans les deux cas, la réussite repose sur la capacité à articuler des acteurs aux logiques, aux temporalités et aux niveaux de maturité très différents autour d'un projet commun. Cette hybridation constitue une force — elle permet de mobiliser des ressources variées, de croiser des cultures professionnelles et d'ancrer les projets dans les réalités territoriales — mais elle rend également ces dispositifs sensibles aux aléas institutionnels, aux changements de priorité politiques ou aux déséquilibres entre partenaires.

La question de la transposabilité se pose. Ni Refactory ni le campus ne peuvent être considérés comme des modèles reproductibles à l'identique : leur efficacité tient largement à des configurations locales spécifiques, à des trajectoires industrielles particulières et à la présence d'acteurs capables de jouer un rôle d'interface. Toutefois, certains principes semblent généralisables : la gouvernance multi-acteurs, la mutualisation des ressources, l'ancrage territorial, l'intégration des compétences comme levier stratégique. La transposition ne peut donc être envisagée que sous forme d'adaptation contextualisée et non de duplication mécanique.

La pérennité de ces dispositifs dépendra quant à elle de leur capacité à se stabiliser dans le temps long. Cela implique de consolider les mécanismes de gouvernance, de sécuriser les engagements des partenaires, d'anticiper les besoins en compétences et de démontrer une valeur ajoutée tangible pour le territoire. La pérennité se construit par la capacité à absorber les évolutions industrielles, à intégrer de nouveaux acteurs, à ajuster les missions et à maintenir un équilibre entre innovation et institutionnalisation.

Ces constats ouvrent des perspectives de développement importantes pour les schémas partenariaux. Les transitions écologique et numérique exigent des formes de coopération plus structurées, plus agiles et plus inclusives. Les territoires devront développer des dispositifs capables d'anticiper les compétences émergentes, de soutenir les reconversions, de coordonner les chaînes de valeurs circulaires et de renforcer les capacités d'innovation collective.

En forme de conclusion, nous pouvons établir que la transposabilité et la pérennité de ces modèles résident non pas dans leur forme actuelle, mais dans leur capacité à évoluer, à s'adapter et à structurer des coopérations durables. Ce constat est le reflet de la période de transition dans laquelle le monde se trouve qui ouvre des perspectives que l'on découvre selon des schémas d'essai-erreur et des leçons que nous en tirons. C'est dans une dynamique

d'apprentissage territorial et de gouvernance partagée que se joue l'avenir des partenariats au service des transformations industrielles et écologiques.

Références bibliographiques

ADEME (2026). Économie circulaire : Définition, enjeux et concepts. https://economie-circulaire.ademe.fr/economie-circulaire

APRADIS C. R. D. (2026). La formation professionnelle : Parent pauvre de la sociologie de l'éducation ? https://pmb.apradis.eu/./index.php?lvl=notice_display&id=10758.

ARAMBOUROU C., Négrier E., Paoletti M., SIMOULIN V. (2021). Politiques de la fusion - Organisations, services, territoires (Tome 34). ISBN 978-2-275-02958-0.

ARTIGUE-DUGENEST S. (2026). Un exemple à l'échelle industrielle de la transformation des compétences en économie circulaire, l'expérience de ReFactory. Annales des Mines - Responsabilité & environnement, 121(1), 75-77. https://doi.org/10.3917/re1.121.0075

ASHEIM B. (2012). The Changing Role of Learning Regions in the Globalizing Knowledge Economy : A Theoretical Re-examination. 46(8), 993-1004. https://doi.org/10.1080/00343404.2011.607805

BOULDING K. E. (1966). The Economics of the Coming Spaceship Earth. In H. Jarrett (Ed.), Environmental Quality in a Growing Economy, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 3-14. First presented by K.E. Boulding at the Sixth Resources for the Future Forum on Environmental Quality in a Growing Economy in Washington, D.C. on March 8,1966.

BOCKEN N. M. P., DE PAUW I., BAKKER C., VAN DER GRINTEN B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy, Journal of Industrial and Production Engineering, 33:5, 308-320. DOI: 10.1080/21681015.2016.1172124.

CHERTOW M. R. (2007). "Uncovering" Industrial Symbiosis. Journal of Industrial Ecology, 11(1), 11-30. https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1110

DOLOWITZ D. P. & MARSH D. (2000). Learning from Abroad : The Role of Policy Transfer in Contemporary Policy-Making. Governance, 13(1), 5-23. https://doi.org/10.1111/0952-1895.00121

EHRENFELD J. & GERTLER N. (1997). Industrial Ecology in Practice : The Evolution of Interdependence at Kalundborg. Journal of Industrial Ecology, 1(1), 67-79. https://doi.org/10.1162/jiec.1997.1.1.67.

Fondation Ellen MacArthur (2021). Objectifs fondamentaux pour l'économie circulaire. https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/2d981cacb015d1a2/original/Objectifs-fondamentaux-pour-leconomie-circulaire-Universal-circular-economy-policy-goals-Print-friendly-version.pdf

FROSCH R. A. & GALLOPOULOS N. E. (1989). Strategies for manufacturing. Wastes from one industrial process can serve as the raw materials for another, thereby reducing the

impact of industry on the environment. Scientific American, 261(3), Vol. 261, No. 3, 144-152. Https://www.jstor.org/stable/24987406.

GEISSDOERFER M., SAVAGET P., BOCKEN N.M.P., HULTINK E.J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?, Journal of Cleaner Production, Vol. 143, 757-768, ISSN 0959-6526. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

GHISELLINI P., CIALANI C. & ULGIATI S. (2016). A review on circular economy : The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, 11-32. DOI:10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

HOMRICH A.S., GALVÃO G., GAMBOA Abadia L., CARVALHO M. (2018). The circular economy umbrella : Trends and gaps on integrating pathways. Journal of Cleaner Production, Vol. 175, 525-543, ISSN 0959-6526. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.064.

KORHONEN J., HONKASALO A., SEPPÄLÄ J. (2018). Circular Economy : The Concept and its Limitations, Ecological Economics, Vol. 143, 37-46, ISSN 0921-8009. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.

KIRCHHERR J., REIKE D., HEKKERt M. (2017). Conceptualizing the circular economy : An analysis of 114 definitions, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 127, 221-232, ISSN 0921-3449. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

LIEDER M., RASHID A. (2016). Towards circular economy implementation : A comprehensive review in context of manufacturing industry, Journal of Cleaner Production, Vol. 115, 36-51, ISSN 0959-6526. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042.

Mckinsey, (2015). Europe's circular-economy opportunity | McKinsey, https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/europes-circular-economy-opportunity?

MORAGA G., HUYSVELD S., MATHIEUX F., BLENGINI G.A., ALAERTS L., VAN ACKER K., De Meester S., Dewulf J. (2019). Circular economy indicators : What do they measure?, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 146, 452-461, ISSN 0921-3449. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045.

MURRAY A., SKENE K., HAYNES K. (2017). The Circular Economy : An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. Journal of Business Ethics. DOI:10.1007/s10551-015-2693-2.

PASQUIER R., SIMOULIN V., WEISBEIN J., CAILLOSSE J. & CATLLA M. (2007). La gouvernance territoriale—Pratiques, discours et théories, Droit Et Societe (numéro 44), ISSN 1295-1943. ISBN 978-2-275-03101-9.

STAHEL W. (2016). The circular economy. Nature 531, 435–438. Https://doi.org/10.1038/531435a.

The Circularity Gap Record (2023). https://www.circularity-gap.world/2023

WINANS K., KENDALL A., DENG H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 68, Part 1, 825-833, ISSN 1364-0321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123.

6 VARIA

Micro-structural and micro-hardness properties of alumina-fluoroapatite composite coatings on 316L stainless-steel: Prothesis application

Halima GHORBEL
Maître de conférences
UVSQ - LATMOS

Radouane AKRACHE
Maître de conférences
UVSQ - LISV

Jinan CHARAFEDDINE
De Vinci Higher Education,
De Vinci Research Center

Awatef GUIDARA
Laboratoire des Matériaux Avances
ENIS - Sfax

Résumé :

Currently Ceramic coatings have been developed to induce a stainless-steel surface modification of implants. In this work, the effect of the alumina (Al_2O_3)- fluorapatite (Fap: Ca_{10} $(PO_4)_6$ F_2) composite coatings on 316 L stainless steel, using atmospheric plasma technology, was investigated. Alumina was chosen to Acta matrix and to provide mechanical properties. Fluorapatite, as the major mineral constituent of vertebrate bones, was introduced in order to increase the biocompatibility and bioactivity of the coatings. A small amount of fluorapatite (6.68 % Fap attributed to 0.25% fluor) was introduced into alumina. The characteristics of the coatings were investigated with various technologies including, X-ray diffraction and thermal analysis "DTA / TGA".

Mots-clés :

Fluorapatite, Alumina, Plasma Spayed Coating “APS”, micro-structure, micro- hardness, biomaterials

Introduction

The development of reliable and long-lasting biomedical implants remains a major challenge in the healthcare industry. In particular, orthopedic and dental implants must simultaneously meet stringent mechanical, chemical, tribological, and biological requirements to ensure adequate clinical performance and long-term service. Ideally, implant materials should exhibit mechanical and surface properties compatible with those of the surrounding bone, while

providing high wear and corrosion resistance, good biocompatibility, and a favorable biological response. However, achieving an optimal combination of these properties within a single material remains challenging. This issue is particularly important for load-bearing applications, such as hip and knee prostheses, where the implant surface is continuously exposed to mechanical stresses, friction, and a physiological environment. Consequently, the development of multifunctional and composite biomaterials has become an important research area for the healthcare and biomedical materials industries.

Bioceramics have attracted considerable attention for bone-related applications because of their excellent chemical stability, biocompatibility, and potential for interaction with biological tissues. Among them, alumina (Al_2O_3) is widely investigated because of its high hardness, excellent wear resistance, chemical stability, and favorable biocompatibility [1–3]. These properties make alumina particularly attractive for applications where high mechanical and tribological performance is required. However, the relatively limited bioactivity of alumina compared with calcium phosphate-based ceramics may restrict its ability to promote direct interaction with bone tissue.

Fluorapatite (FAp, $Ca_5(PO_4)_3F$), a calcium phosphate ceramic, is also considered a promising biomaterial because of its chemical similarity to the mineral phase of bone and teeth. Compared with β-tricalcium phosphate (β-TCP) and hydroxyapatite (HA), fluorapatite exhibits good chemical stability as well as suitable biological and mechanical properties. The incorporation of fluorine into the apatite structure can also provide additional biological benefits, particularly in relation to the inhibition of dental caries [4]. Moreover, fluorine is naturally present in human bone, at a concentration of approximately 1 wt% [5,6]. These characteristics make FAp an attractive candidate for biomedical applications, particularly where a combination of structural stability and biological functionality is required.

Nevertheless, the individual use of alumina or fluorapatite does not necessarily provide the optimum combination of mechanical and biological properties required for advanced implant applications. The combination of these two ceramic phases therefore represents an interesting strategy for developing composite materials in which the high hardness and wear resistance of alumina can be combined with the biological characteristics of fluorapatite. Such an approach is particularly relevant for the development of functional surfaces for orthopedic and dental implants, where the surface properties play a critical role in implant durability and interaction with the surrounding biological environment.

Surface engineering and thermal spray technologies offer an attractive route for tailoring the properties of metallic implant substrates without modifying their bulk mechanical properties. Among these techniques, atmospheric plasma spraying (APS) is widely used for the deposition of ceramic coatings because it enables the processing of high-melting-point materials and the production of relatively thick coatings with controlled composition and microstructure [7]. The deposition of ceramic coatings onto metallic substrates can therefore provide an effective means of combining the mechanical toughness of the metallic substrate with the specific surface properties of ceramic materials.

In this context, 316L stainless steel remains an important metallic substrate for biomedical applications owing to its mechanical strength, corrosion resistance, and established use in medical devices. However, its surface properties may be further improved through the deposition of ceramic coatings designed to enhance hardness, wear resistance, chemical stability, and potentially biological performance. The development of alumina–FAp

composite coatings on 316L stainless steel is therefore of particular interest as a potential approach for designing multifunctional surfaces for biomedical applications.

The present study investigates an Al_2O_3–6.68 wt% FAp composite coating deposited onto 316L stainless steel by atmospheric plasma spraying. The microstructural, phase, thermal, and microhardness characteristics of the alumina and alumina–FAp coatings were systematically investigated. Particular attention was paid to phase evolution during plasma spraying, the formation of possible reaction products at the alumina–FAp interface, and the resulting mechanical properties of the coatings. The objective is to assess the feasibility of combining alumina and fluorapatite within a composite coating and to evaluate its potential as a surface-engineering strategy for the development of advanced biomedical implant materials.

Experimental

The fluorapatite powder was synthesized using a wet-chemical method [8-9]. Analytical grade $Ca(NO_3)_2.4H_2O$, $(NH_4)_2HPO_4$ and NH_4F were used as starting materials. A calcium nitrate solution was slowly poured into a boiling solution containing diammonium hydrogen phosphate, using a peristaltic pump; the 28% NH_4OHsolution was added to the mixture and the pH was adjusted to 9. The precipitate was aged by stirring at 80**°C** for 1h, then filtered, washed, dried at 70**°C** for 12h and calcined at 500**°C**. Each undesirable synthesized powder was instantly eliminated. Highly pure α-alumina (α-Al_2O_3) powder (Riedel-de haën, 98%) was used in all experiments. The $Al_2O_3$and 6.68 wt% Fap powders were mixed in an agate mortar. The powder mixtures were milled in ethanol. After milling and homogenization techniques, the mixtures were dried at 80**°C** for 24h.

To get information about the thermal behavior of the used powders, differential

thermal analysis and thermo-gravimetry were carried out using about 30 mg of powder (DTA-TG; Model Setaram). The raw material and microstructure of the coated samples were examined in an X-ray diffractometer using CuKα (PHILIPS-PANALYTICAL; X'PERT pro MPD); the crystalline phases were identified by reference to the International Center for Diffraction Data (ICDD) cards.

The alumina and alumina-6.68 wt% fluorapatite coatings were carried out on 316 L stainless steel discs by Atmospheric plasma spraying "APS" using a Sulzer-Metco F4- MB (Switzerland) plasma gun mounted on an ABBIRB2400 robot (Sweden). Before applying the coating, degreasing and grit blasting were carried out to make the substrate surface coarse and clean. The plasma spray process parameters are listed inTable1.The coating thickness was evaluated by measuring the substrate thickness before and after plasma spraying, using a micrometer (250 µm).

Table1. Plasma Spray Process Parameters

Starting powders	Current (A)	Ar flow rate (l/min)	He flow rate (l/min)	Carrier gas flow rate (l/min)	Spray distance (mm)	Temperature (°c)
Al_2O_3	600	35	8	3	120	Room temperature
Al_2O_3-6.68 wt% Fap	600	35	8	3	120	70

The microstructure of the coating samples was examined with scanning electron microscope (SEM) (JEOL JSM 5600LV). The roughness of the surfaces of both substrate and coatings was measured using Mitutoyo (ISO 1997).

Results and discussion

Thermal Characterization of the Alumina and the Al_2O_3-6.68 wt% Fap Composites

Figure 1 presents the DTA and TGA curves of the powders investigated. The alumina powder exhibits an endothermic peak at approximately 215 °C, accompanied by a weight loss of about 0.4%. This mass loss is attributed to the removal of adsorbed water and dehydration of the powder.

The DTA curve of the Al_2O_3–6.68 wt% FAp composite powder displays four endothermic events. The first peak, located at approximately 220 °C, corresponds to powder dehydration and is associated with a weight loss of about 0.5% in the TGA curve. The second, weaker peak at around 250 °C is attributed to the decomposition of carbonate and hydrogen phosphate species, resulting in the release of gaseous products.

The third endothermic event, observed at approximately 1200 °C, is likely related to the formation of a liquid phase through a binary eutectic reaction involving CaF_2 and fluorapatite [9]. The final peak, centered around 1350 °C, is attributed to the formation of calcium aluminate phases through an interfacial reaction between Al_2O_3 and fluorapatite. This reaction occurs at high temperatures, typically between 1200 and 1400 °C [10], and is not associated with any significant weight loss.

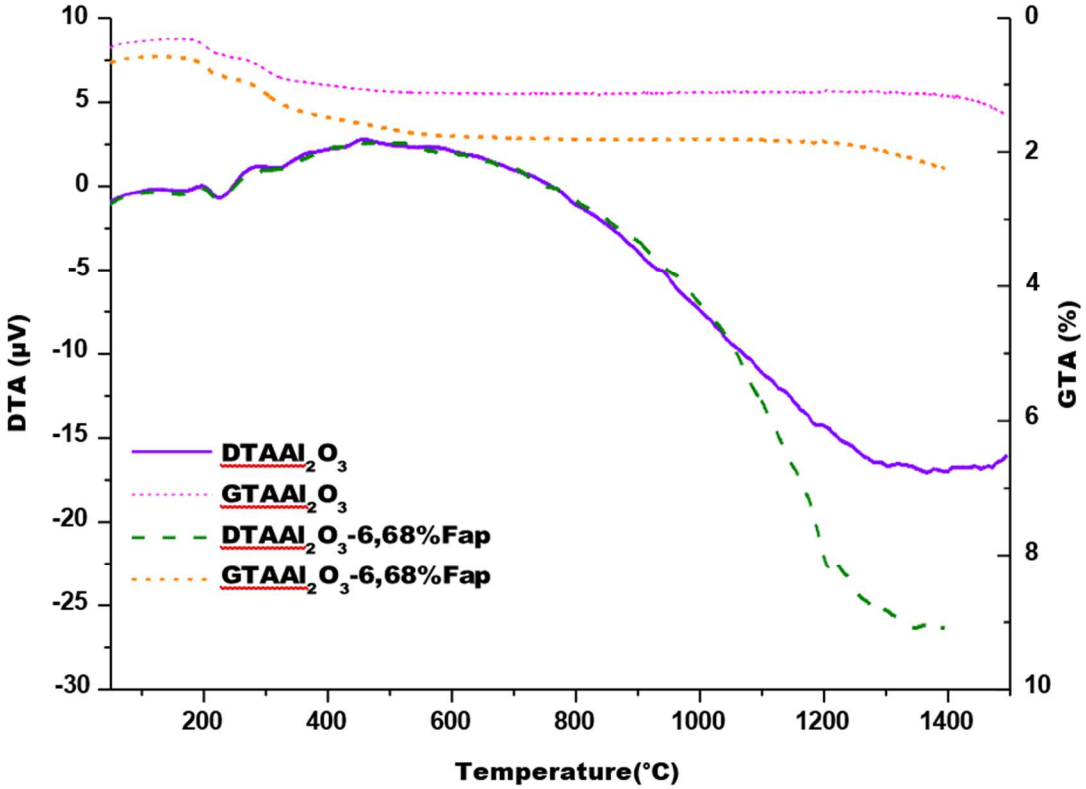


Figure1. GTA / DTA curves of: Al_2O_3 and Fap-Al_2O_3 composite.

DRX analysis

The X-ray diffraction pattern of used alumina and fluoroapatite powders are shown in Figure 1. The pattern of alumina powders exhibits peaks corresponding to α- Al_2O_3 phase (Figure 4.a). The fluoroapatite powder pattern reveals only peaks of Fap (Figure 4.b). It must be kept in mind that the XRD analysis does not detect the presence of a small number of impurities, especially when compounds have poor crystallinity.

The X-ray diffraction patterns of alumina and alumina-Fap coating expose in Figure 5. Figure 5.a. illustrates the diffractogram of APS alumina coating produced. The new phase of alumina "A" $(Al_2O_3)_{5.333}$ [01-074-2206] was appearing, and the corundum alumina "C" (Al_2O_3) [00-046-1212] phases was obtained on the APS surfaces. The pure phases of alumina and fluoroapatite "F" (Ca_5 $(PO_4)_3F$) [00-015-0876] peaks were still observed (Figure5.b); and only secondary fluorite peaks "Ft" (CaF_2) [00-035-0816] was detected on composite surface. We note the crystalline Fap system transition does not take place at a higher temperature of Plasma Projection. So, it is imported to determinate the crystallinity ratio coatings (ISO 13779-3: 2008). In this way, this ratio is determined by measuring the ten integrated intensities of the Fap coating diagram compared with those of a Fap reference as shown in equation.1.

$$Rc=\sum(hkl)A/\sum(hkl)A'\times100 \qquad (1)$$

The crystallinity ratio of the fluorapatite-containing coatings obtained after 12 plasma passes

was determined according to ISO 13779-3:2008. A crystallinity ratio of **Rc=85.26%** was obtained for the FAp coating. This relatively high value indicates that the coating exhibits a high degree of crystallinity and meets the requirements of the standard. Moreover, the crystallinity ratio is significantly higher than that reported for a hydroxyapatite coating produced by Imane Demnati (Rc=68%) [11]. These results suggest that the plasma spraying parameters were well controlled, leading to limited amorphous-phase formation and, consequently, to a predominantly crystalline FAp coating.

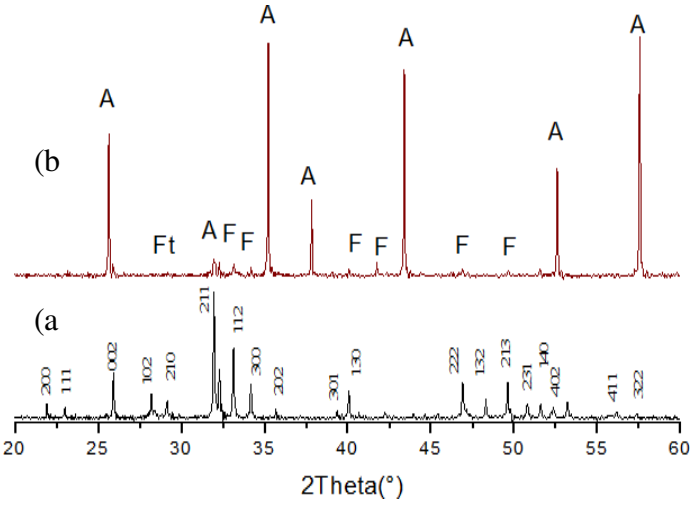


Figure 4. XRD patterns for:(a) calcined Fap powder(b)Al_2O_3 -Fap powder

A: Aluminumα(Al_2O_3) [00-046-1212]; F: Fluoroapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$) [00-015-0876]; Ft: Fluorite (CaF_2) [00-035-0816].

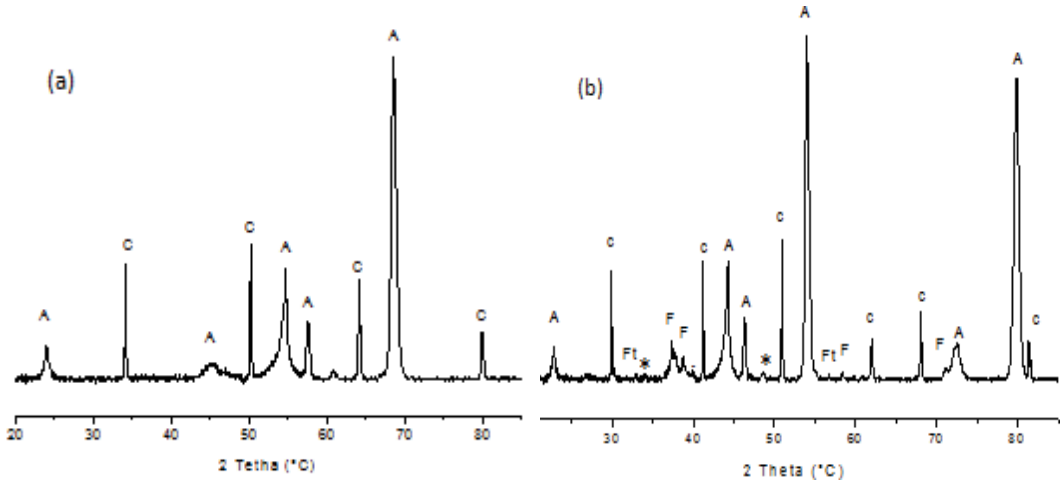


Figure5.XRD patterns for:(a) Al_2O_3 coating(b) Al_2O_3 -Fap coating

A: Alumina (Al_2O_3)5.333[01-074-2206]; C: Corundum (Al_2O_3) [00-046-1212]; F: Fluoroapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$) [00-015-0876]; Ft: Fluorite (CaF_2) [00-035-0816].

Micro-Hardnessmeasurements

Hardness of a material describes the resistance to surface damage. The micro- hardness variation of measured specimens was estimate dusing a loading force of 200 g. The figure 6 presents the testing results together. Results indicated that a lower micro- hardness of the alumina-Fap ~663 $HV_{0.2}$as compared to that of ~737 $HV_{0.2}$for alumina coatings, but less high than that of ~411 $HV_{0.2}$for uncoated substrates. The increase in micro-hardness was mainly attributed to a fully denser structure of the as-deposited alumina coatings formed on the surface of the uncoated substrates, the existence of well-dispersed Fap particle which acted as a reinforcing phase in the as-received coatings was therefore correlated to the beneficial effects of both the particulate reinforcement and dispersion strengthening, and the formation of the calcium aluminates precipitated phase along the defective regions in the coatings could make great contributions to structural densification by means of generating an effective bonding link on completing those cracking bound an interfaces for the inhibition of sliding dislocations and coarsening toughness of the as-deposited alumina coatings reinforced with Fap particles [12-13]. The basic mechanical properties of alumina ceramic are related to its hardness, it is significantly harder than every material used in orthopedic surgery [14].

The research was shown that a lumina has a high-level of hardness “2000 Vickers” compared with a value of less than 500 Vickers hardness for orthopedic materials such as cobalt chrome and titanium [15]. The results of micro hardness found for alumina coating a lower than those found in the literature. Although it is difficult to compare data from the literature, as different conditions were used, as different techniques to elaborate the materials. Hu et al reported of the deposition of Ni powder with alumina on substrate by cold spraying and the coating micro hardness was approximately 206 Hv [16].

The lower micro-hardness for stainless steel substrate was mainly caused by the presence of several slightly brittle micro-cracks. Due to its poor fracture toughness and low resistance to plastic deformation of stainless-steel substrate.

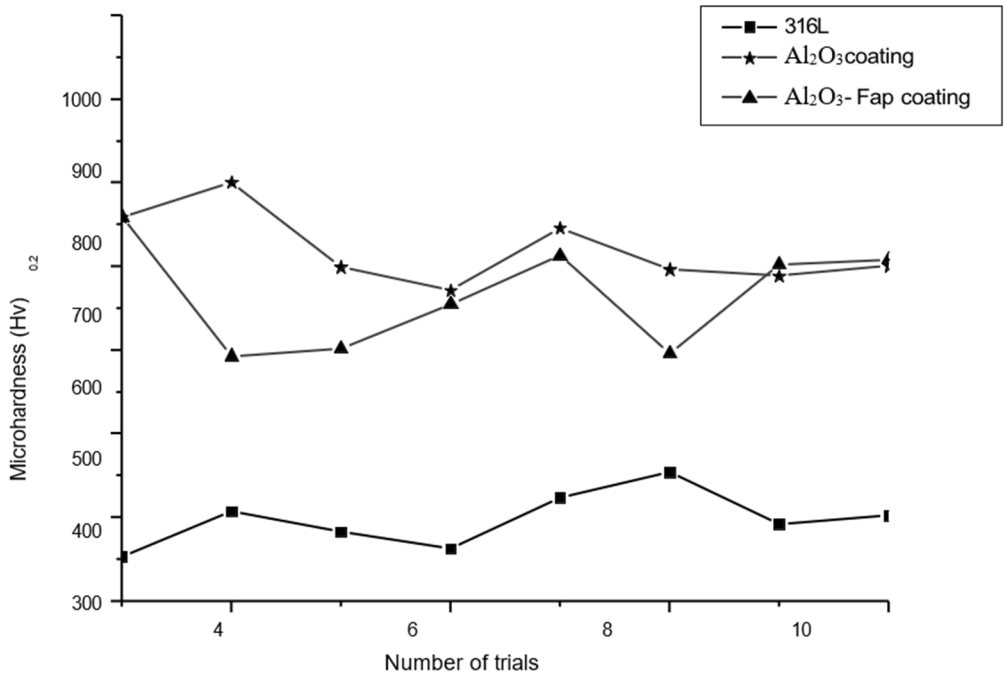


Figure 6. The variation of Vickers micro-hardness registered for respective specimen

Conclusion

Alumina and alumina–fluorapatite (FAp) coatings were successfully deposited onto 316L stainless steel substrates using the atmospheric plasma spraying (APS) process. The microstructural and mechanical properties of the as-deposited coatings were investigated, with particular emphasis on phase evolution and microhardness. The main conclusions can be summarized as follows:

1. The DTA/TGA results indicate the occurrence of chemical interactions between alumina and fluorapatite during the plasma spraying process. The presence of Ca- and Al-containing phases at the alumina–FAp interface suggests the formation of calcium aluminate phases resulting from the reaction between alumina and fluorapatite at high temperature.
2. The deposited coatings exhibited significantly higher microhardness than the uncoated 316L stainless steel substrate. Microhardness values of approximately 737 $HV_{0.2}$ for the alumina coating and 663 $HV_{0.2}$ for the alumina–FAp coating were measured, compared with 411 HV0.2 for the stainless steel substrate. The enhanced hardness of the coatings is mainly associated with their microstructural characteristics and the dense ceramic structure formed during the APS deposition process.

Overall, these results demonstrate that APS deposition significantly improves the surface hardness of 316L stainless steel, while the incorporation of FAp modifies the microstructure and mechanical response of the alumina-based coating.

From an industrial and biomedical perspective, the present results demonstrate the potential of alumina–FAp composite coatings as a promising material platform for the development of next-generation biomedical devices. The combination of the mechanical performance of alumina with the bioactive characteristics of fluorapatite could contribute to the development of advanced composite materials for orthopedic and dental applications, particularly for hip and knee prostheses, dental implants, and other implantable devices. The ability to tailor the composition and microstructure of these composite coatings could provide opportunities to optimize their mechanical, tribological, and biological properties according to specific clinical requirements. Further studies on adhesion, wear resistance, corrosion behavior, biocompatibility, and long-term performance under physiological conditions are nevertheless required before considering their potential transfer to biomedical applications.

Références bibliographiques

WOLKE J.G.C., DHERT W.J.A., KLEIN C.P.T.A., de GROOT K., de BLIECK HOGERVOST J.M.A..(1991) Characterization of plasma-sprayed fluoroapatite coatings for biomedical applications, *Mater Sci Monographs* **69**, 285-294.

DHERT W.J.A., THOMSON P., KLEIN C.P.T.A., de GROOT K., ROZING P.M., ERICSON L.E.. (1994) *J. Mater. Sci. Mater. Med* **5**, 59-66.

CHENG K.,WENG W., HAN G., DU P., SHEN G.,YANG J., FERREIRA J.M.F. (2003) *Mater. Chem. Phys***78**,767-771.

SOMRANI S.(1990). Thèse de spécialité, Mise en forme d'apatites nanocristallines : céramiques et ciments université de Tunis, Tunisie.

FRANZ E.D., TELLE R. (1987). In: *High Tech*, pp.31-41, P. Vincenzini (Ed), *Ceram*, Reaction Hot Pressing of Fluorapatite for Dental Implants.

MARK F., BROWN P.W. (1992) *Journal of the American Ceramic. Society* **75** (12), 3401.

HEIMANN R.B.. (1996) Plasma Spray Coating Principles and Applications, VCH Weinheim, New York.

BEN AYED F., BOUAZIZ J., BOUZOUITA K. (2000) Pressureless Sintering of Fluorapatite Under Oxygen Atmosphere, *Journal of European Ceramic Society***20**, 8, 1069-1067.

BEN AYED F., BOUAZIZ J., BOUZOUITA K. (2001)*J.AlloysCompd***322**(1–2),238–245.

ADOLFSSON E., NYGREN M., HERMANSSON L.(1999)*J.Am.CeramSoc***82**, 2909.

SENAMAUD N., BEMACHE-ASSOLANT D., CHAMPION E., HEUGHEBAERTB M., REYB C. (1997) Calcination and sintering of hydroxyfluorapatite powders, *Solid State Ionics,* 101- 103, 1357-1362.

NS.Qu,D.Zhu,KC. Chan.(2006)*ScriptaMater***54**, 1421–1425.

ZHOU XW., SHEN YF. (2013) *Surf.Coat. Technol* **235**, 433–446.

HAMADOUCHE M., MEUNIER A., NIZARD R., HANNOUCHE D., BIZOT P. and SEDEL L. (2006) Alumina-on-Alumina Articulation in Total Hip Arthroplasty: From Bench- side to Bedside, *Semin Arthro* **17**, 125-133.

GARINO J., RAHAMAN M.N., SONNY BAL B. (2006) The Raliability of modernAlumina: Bearings in Total Hip Arthroplasty, *Seminars in Arthroplasty* **17**, p. 113- 119.

HU HX., JIANG SL., TAO YS., XIONG TY., ZHENG YG. (2011) *Nucl. Eng. Des* **241**, 4929-4937.

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

Neuro-surveillance et subordination : vers un *Habeas Mentem* social



Pr. Benoît PETIT
Professeur des universités (droit privé, sciences criminelles)
Université Paris-Saclay, UVSQ
Laboratoire LIMEEP-PS
Directeur de l'IUT de Mantes-en-Yvelines

Résumé

L'essor des neurotechnologies et des interfaces cerveau-machine dans la sphère productive marque une rupture anthropologique majeure : le déplacement de la frontière de la subordination. Du contrôle de l'exécution (le faire), le pouvoir de direction s'étend désormais à la surveillance de l'intériorité cognitive (l'être), prétendant mesurer la vigilance ou la charge mentale en temps réel.
Cet article démontre l'inadaptation structurelle du droit positif européen face à cette « effraction cognitive ». Les qualifications usuelles du RGPD, du règlement EHDS ou du récent AI Act s'avèrent inopérantes pour saisir l'hybridité de la donnée neurale, souvent instrumentalisée sous couvert d'impératifs de sécurité.
Face au risque d'une transparence totalitaire et d'une déstabilisation du régime probatoire, l'auteur plaide pour la consécration d'un *Habeas Mentem* social. Au-delà de la reconnaissance de droits substantiels (liberté cognitive, imputabilité), cette nouvelle immunité implique une socialisation du pouvoir technologique. L'étude propose ainsi d'ériger l'accord collectif majoritaire et l'expertise algorithmique du CSE en verrous procéduraux indispensables pour préserver le for intérieur, dernier sanctuaire de la dignité du travailleur.

Mots-clés

Neurotechnologies – Subordination – Données neurales – *Habeas Mentem* – Liberté cognitive – Surveillance – Pouvoir de direction – Santé au travail – RGPD – Intelligence Artificielle

Nos conceptions juridiques reposent sur un pacte tacite : « La loi ne dirige que les actions extérieures ; elle n'a point de prise sur la pensée » (Portalis). Cette frontière entre le for externe et le for intérieur, écho de la distinction kantienne, demeure la clé de voûte de notre ordre juridique. Elle irrigue la pensée d'auteurs comme Alain Supiot, pour qui la subordination organise la mise à disposition de l'« avoir » du salarié (sa force de travail), mais protège jalousement son « être »[36]. Comme le rappelle Xavier Bioy, cette part de secret, cette "opacité" de la personne, n'est pas une dissimulation coupable, mais la condition *sine qua non* de la dignité humaine[37].

Ainsi, si le contrat de travail soumet l'activité du travailleur à l'autorité de l'employeur, cette subordination s'est toujours heurtée à l'opacité naturelle de l'esprit humain. L'employeur pouvait commander le geste ou évaluer le résultat, mais l'intériorité du subordonné lui demeurait, par essence, étrangère.

[36] A. SUPIOT, *Critique du droit du travail*, PUF, coll. « Quadrige », 2015 (rééd.), spéc. pp. 115 et s. ;
[37] X. BIOY, *Droits fondamentaux et libertés publiques*, LGDJ, coll. « Précis Domat », 7e éd., 2024, spéc. les développements sur le « droit au respect de la vie privée » et l'« autonomie personnelle » ;

Cette étanchéité séculaire est aujourd'hui en passe de céder. L'irruption des neurotechnologies et des Interfaces Cerveau-Machine (ICM) dans la sphère productive opère une rupture de nature. En captant le signal nerveux avant qu'il ne devienne comportement, ces dispositifs réalisent le fantasme (de certains) d'une subordination totale qui prétend régir l'intégrité mentale. Loin de la science-fiction, la neuro-surveillance est déjà une réalité opérationnelle. L'exemple du système *SmartCap,* déployé dans l'industrie minière ou les transports, atteste de cette « effraction » : sous couvert d'équipement de protection (EPI), il analyse en temps réel l'activité électroencéphalographique (EEG) pour détecter la fatigue. Si la finalité sécuritaire semble inattaquable, elle ouvre une brèche que d'autres acteurs élargissent vers l'optimisation cognitive.

Des outils comme les casques *Emotiv* mesurent désormais l'attention et la charge mentale. Le glissement est manifeste : dès lors que l'employeur peut percevoir la baisse de vigilance ou laisser un algorithme adapter les tâches à l'état neuronal, le pouvoir de direction ne s'arrête plus aux frontières du corps. Il s'opère une mutation fondamentale du lien de subordination, risquant une « hygiénisation » du droit du travail où, sous couvert d'une transparence totale, le travailleur serait une entité biologique à auditer. Une telle perspective constitue sans doute le rêve ultime d'une rationalité économique devenue prédatrice : coloniser le dernier territoire vierge du salarié pour dissoudre l'aléa humain dans la certitude de l'algorithme.

Cette captation nécessite l'extraction d'une ressource singulière : la donnée neurale. Définie comme toute information extraite de l'activité électrophysiologique ou hémodynamique du système nerveux central[38], permettant d'inférer des états cognitifs, émotionnels ou volitionnels[39] (conscients ou infra-conscients)[40], elle présente trois spécificités. D'abord, c'est une donnée pré-comportementale : captant l'influx avant l'action, elle surveille la mobilisation des ressources internes plutôt que le comportement. Ensuite, c'est une construction : le tracé brut est illisible sans une interprétation probabiliste par l'IA. Enfin, elle n'est pas toujours une donnée de santé : révélant un niveau de concentration plutôt qu'une pathologie, elle devient une donnée de performance physiologique, échappant potentiellement à la protection absolue des données de santé.

Intrinsèquement complexe, la donnée neurale capture le non-dit et peut trahir ce que le sujet souhaite dissimuler, portant en germe un risque de violation du droit au silence. Face à cette accélération technologique, le refus dogmatique est une impasse. Pour anticiper ces violences, l'arsenal législatif actuel, conçu pour les corps et les actes, parait structurellement impuissant à saisir cette effraction de l'intime (I) ; il appelle non pas un simple ajustement technique, mais une refondation des droits fondamentaux autour d'un véritable *Habeas Mentem* (II).

I – L'appréhension normative inadaptée de l'effraction cognitive

La protection du travailleur face aux neurotechnologies se heurte aujourd'hui à une inadéquation fondamentale de l'architecture juridique européenne. Conçus pour protéger

[38] OCDE, *Recommandation du Conseil sur l'innovation responsable dans les neurotechnologies*, OCDE/LEGAL/0457, 2019 ; v. aussi M. IENCA & R. ANDORNO, « Towards new human rights in the age of neuroscience », *Life Sciences, Society and Policy*, 2017 ;
[39] Nita FARAHANY, *The Battle for Your Brain*, 2023 ; v. aussi ICO (Information Commissioner's Office - UK), *ICO Tech Futures: Neurotechnology*, 2023 ;
[40] Les travaux de Benjamin LIBET sur le potentiel de préparation motrice ; v. aussi Comité International de Bioéthique de l'UNESCO, *Rapport sur les aspects éthiques des neurotechnologies*, 2021 (paragraphes 32 et s.) ;

l'extérieur de la personne (vie privée, données biométriques d'identification) ou pour réguler des risques techniques, nos textes se fissurent dès qu'ils sont confrontés à l'intériorité biologique du sujet (données inférées, sécurité au travail, administration de la preuve).

A. Des catégories protectrices inopérantes face à l'hybridité de la donnée neurale

1. L'inconfort des qualifications usuelles proposées par le RGPD et l'EHDS

L'appréhension juridique de la surveillance cérébrale se heurte, en premier lieu, à l'obsolescence de nos taxinomies actuelles. Construit autour de catégories étanches (données personnelles, de santé ou biométriques), le cadre normatif européen peine à saisir la nature irréductiblement hybride de la donnée neurale. Celle-ci est biologique par sa source (le corps), psychique par sa signification (l'esprit) et comportementale par sa destination (le contrôle). Or, en tentant de faire entrer cette réalité protéiforme dans les cases préétablies du RGPD, l'on s'expose à une dangereuse déconvenue : la croyance en une protection absolue là où les textes organisent, à leur insu, les conditions de la licéité.

Cette friction est particulièrement manifeste s'agissant du régime d'interdiction édicté par l'article 9 du RGPD relatif aux « données sensibles ». Le réflexe serait de ranger la donnée neurale sous la bannière de la biométrie ou de la santé. Or ces qualifications s'avèrent juridiquement instables.

L'assimilation à la biométrie[41] est discutable. Le RGPD liant celle-ci à une finalité d'identification unique, l'employeur visant la détection de défaillances performatives pourra aisément contester cette qualification pour échapper au régime de protection renforcée[42].

Quant à l'assimilation à une donnée de santé, elle place l'analyse sur une ligne de crête. Certes, la CJUE retient une conception extensive de la notion, incluant tout élément ayant un lien avec l'état physiologique[43]. Pourtant, la pratique managériale s'engouffre dans une "zone grise" en opérant un glissement sémantique de la *santé* vers la *performance*[44]. Dès lors que la captation de l'activité cérébrale ne vise pas explicitement à révéler une pathologie ou un état clinique, mais à quantifier une "aptitude fonctionnelle" (charge mentale, concentration…), l'employeur extrait la donnée de la sphère médicale *stricto sensu*. Il transforme ainsi une constante biologique en pure métrique de productivité, fragilisant d'autant la protection attachée au secret médical.

Cette tentative d'éviction de la qualification sanitaire se heurte désormais à la réalité de l'Espace Européen des Données de Santé (EHDS)[45]. En entérinant une définition extensive des "données de santé électroniques", qui englobe jusqu'aux facteurs incidents sur la santé et

[41] Règlement (UE) 2016/679 (RGPD), art. 4, 14 ;

[42] La donnée neurale demeure néanmoins une donnée personnelle, traitée comme telle : CEPD (Comité Européen de la Protection des Données), *Lignes directrices 3/2019 sur le traitement des données à caractère personnel par des dispositifs vidéo*, version 2.0, 29 janv. 2020, pt 73 ; v. aussi CNIL, *Reconnaissance faciale : pour un débat à la hauteur des enjeux*, 15 nov. 2019 ;

[43] CJUE, 6 nov. 2003, Bodil Lindqvist, C-101/01, pt 50 ; v. aussi CJUE, 21 déc. 2023, Krankenversicherung Nordrhein, C-667/21 ;

[44] Plusieurs autorités ont souligné que les données de 'mode de vie' collectées pouvaient devenir des données de santé par croisement ou finalité médicale : Groupe de l'Article 29, *Lettre à la Commission européenne concernant les applications de mHealth,* 10 avril 2015 ; CNIL, *Fiche pratique "Montres connectées, applications de bien-être, etc. : que faut-il savoir ?",* 14 juin 2023 ;

[45] Règlement (UE) 2025/327 du 11 février 2025 ;

au mode de vie, le texte semble *a priori* recréer le lien juridique rompu. Toutefois, ce filet de sécurité pourrait se révéler illusoire. Certes, l'article 35 du règlement EHDS interdit formellement l'usage secondaire de ces données pour prendre des décisions préjudiciables aux conditions d'emploi. Néanmoins, ce garde-fou ne fait pas obstacle à la collecte primaire opérée par l'employeur, et valide explicitement l'usage des données pour l'entraînement d'algorithmes (art. 34). Dès lors, loin de sanctuariser l'intégrité mentale, ce cadre risque paradoxalement de normaliser la captation massive de neuro-données sous la bannière vertueuse de la recherche ou de la prévention. L'ambiguïté téléologique est manifeste : une mesure disciplinaire fondée sur une baisse d'attention neuronale pourra toujours être 'requalifiée' par l'employeur en mesure de sécurité, contournant ainsi l'interdit légal.

Car sitôt que l'écueil de la qualification est franchi et que la donnée neurale intègre le sanctuaire de l'article 9.1 du RGPD, la protection demeure éminemment réversible. L'article 9.2, organise la levée de l'interdit dès lors que le traitement est "*nécessaire aux fins de l'exécution des obligations [...] en matière de droit du travail"*. Le piège se referme avec l'obligation de sécurité (art. L. 4121-1 C. trav.) : si un dispositif démontre sa capacité à prévenir un accident, son utilisation peut devenir une exigence juridique pour l'employeur[46]. L'impératif de sécurité physique risque alors de justifier, par vases communicants, une transparence psychique totale.

2. Les apories de la régulation par l'outil : le Règlement IA face au risque cognitif

Un autre rempart contre l'effraction de l'intime aurait pu être érigé par le tout récent Règlement sur l'Intelligence Artificielle (RIA), adopté en 2024[47], qui se présente comme la *lex specialis* de la régulation technologique. L'article 5 du texte nourrit, de prime abord, cette espérance en classant parmi les "pratiques inacceptables" l'utilisation de systèmes d'IA destinés à inférer les émotions sur le lieu de travail[48]. Cette interdiction se heurte toutefois à une aporie sémantique. En focalisant l'interdit sur l'émotion (peur, joie...), le législateur ignore le spectre de la cognition (attention, vigilance). Les dispositifs de neuro-productivité, ne prétendant pas sonder l'âme affective mais auditer la "disponibilité neuronale", s'extraient *de facto* du champ de l'interdiction. L'employeur pourra ainsi aisément arguer qu'un système détectant la « baisse de vigilance » ou la « distraction » mesure une constante physiologique objective et non un état émotionnel subjectif.

Certes, ces systèmes basculeront mécaniquement dans la catégorie des IA à « Haut Risque » visée par l'Annexe III du Règlement (systèmes destinés à la gestion de la main-d'œuvre)[49]. Mais cette classification n'impose qu'une conformité procédurale (transparence, contrôle humain théorique, qualité des données) qui ne remet jamais en cause le principe même de la

[46] A rapprocher de CE, 5 déc. 2016, n° 394178, où le Conseil d'État valide des atteintes à la vie privée (tests salivaires de drogues) au nom de l'impératif de sécurité pour les postes hypersensibles ;
[47] Règlement (UE) 2024/1689 du 13 juin 2024 (IA Act) ;
[48] Cette interdiction doit être lue à la lumière de la définition du "système de reconnaissance des émotions" (art. 3, pt 39) qui vise à déduire ou inférer les "émotions ou les intentions". Cette définition textuelle stricte laisse en effet planer une incertitude sur les systèmes mesurant des états purement physiologiques (fatigue) ou cognitifs (charge mentale) ;
[49] Règlement (UE) 2024/1689, Annexe III, pt 4, b) : sont classés à haut risque les systèmes d'IA destinés à être utilisés pour "prendre des décisions concernant [...] la promotion et la résiliation des relations contractuelles liées au travail, attribuer des tâches sur la base du comportement personnel ou de traits ou caractéristiques personnels, ou pour surveiller et évaluer la performance et le comportement de personnes" ;

captation neuronale. La régulation du risque technique occulte ici la violence de l'atteinte anthropologique.

Le coup de grâce est porté par le texte lui-même qui, en tout état de cause, assortit l'interdiction de l'article 5 d'une exception dirimante lorsque l'usage est justifié par des motifs de sécurité[50]. Nous retrouvons ici la même mécanique d'éviction que dans le RGPD : l'impératif sécuritaire agit comme un solvant des droits fondamentaux. Le Règlement IA, loin d'ériger un cordon sanitaire, normalise l'ouverture de l'intime sous condition de sécurité[51].

B. Le désarmement judiciaire du salarié face à la puissance technologique

1. L'instrumentalisation de l'obligation de sécurité au service d'une surveillance neurale

C'est au stade du contentieux qu'un second piège pourrait se refermer sur le salarié. L'introduction de ces métriques cognitives dans le prétoire déstabilise les fondements mêmes du régime probatoire, substituant à la réalité des faits une « vérité algorithmique « quasi-irréfragable.

L'irruption des neurotechnologies opère en effet un glissement tectonique de l'objet de la surveillance. Traditionnellement, le pouvoir de contrôle de l'employeur s'exerce sur le « faire « : il sanctionne un comportement observable, une tâche mal exécutée ou un résultat non atteint. Avec la captation de l'attention ou de la vigilance, on bascule vers un contrôle de l'« être «. Ce n'est plus l'acte qui est évalué, mais la disposition physiologique à agir. Cette mutation consacre une forme d'« hygiénisation « du lien de subordination, où l'employeur s'arroge le droit d'auditer la vitalité neuronale de son subordonné en temps réel[52].

Face à cette immixtion, le contrôle de proportionnalité classique semble désarmé. Si la jurisprudence a pu limiter la géolocalisation ou la surveillance électronique[53], ces garde-fous reposent sur une balance des intérêts où la vie privée pèse lourd face à un simple intérêt organisationnel. Or la neuro-surveillance avance masquée derrière l'impératif absolu de la sauvegarde de la vie. Comment déclarer « disproportionnée « une mesure, certes intrusive, mais qui prétend réduire de moitié les accidents mortels ? L'argument de la sécurité rend ardu le contrôle judiciaire de l'atteinte aux libertés.

2. L'asymétrie probatoire : de la preuve déloyale à la vérité algorithmique

Ce déséquilibre est aggravé par le revirement de l'Assemblée Plénière du 22 décembre 2023[54]. En admettant la recevabilité de la preuve déloyale, la Cour ouvre une voie périlleuse. Certes, la preuve doit être indispensable à l'exercice du droit à la preuve. Mais c'est là que réside le danger. Pour démontrer une inattention pure sans conséquence matérielle immédiate, quelle

[50] Règlement (UE) 2024/1689, art. 5, § 1, f) ;
[51] Sur la tyrannie de la sécurité : P. Adam, *L'individualisation du droit du travail : essai sur la réhabilitation juridique du salarié-individu*, LGDJ, 2005 ;
[52] Cette dérive rejoint les craintes exprimées par A. Supiot sur la « biologisation » du droit social, où la personne du travailleur tend à être réduite à ses fonctionnalités physiologiques : *L'esprit de Philadelphie*, Seuil, 2010 ;
[53] Cass. Soc., 3 nov. 2011, n° 10-18.036 ; CEDH, G.C., 5 sept. 2017, Bărbulescu c. Roumanie, 61496/08 ;
[54] Cass. Ass. Plén., 22 déc. 2023, n° 20-20.648 : la Cour juge désormais que l'illicéité dans l'obtention de la preuve ne conduit pas nécessairement à son rejet, à condition que la production soit « indispensable à l'exercice de ce droit et que l'atteinte soit strictement proportionnée au but poursuivi ». Pour une critique des risques induits par ce revirement sur les preuves numériques : J.-F. Cesaro, « La fin de la preuve loyale en droit du travail ? », *JCP S*, 2024, 1005

autre trace existe-t-il que l'enregistrement neuronal ? L'employeur aura beau jeu de démontrer l'impasse probatoire pour forcer l'admission de la donnée. Le « droit à la preuve « de l'entreprise viendrait alors percuter de plein fouet l'intégrité mentale du travailleur.

S'installe alors une redoutable asymétrie des armes. Face à la « science « de l'algorithme, qui se présente sous l'apparence de l'objectivité mathématique, que pèse la parole du salarié ? Ce dernier se trouve confronté à une véritable *probatio diabolica* : comment apporter la preuve contraire de son état de concentration passé ? Comment prouver que l'on « ne rêvassait pas « face à une machine qui prétend avoir lu les ondes cérébrales ? La donnée neurale acquiert *de facto* une valeur de vérité supérieure au témoignage humain[55]. On sanctionnerait le processus cognitif plutôt que son résultat matériel. Le droit du travail s'engagerait alors sur la pente glissante de la « faute de pensée «, où le salarié pourrait être puni non pour avoir mal travaillé, mais pour n'avoir pas été mentalement disposé à travailler avec l'intensité requise par l'algorithme.

Ce constat d'impuissance contraste singulièrement avec la limpidité de la réponse apportée outre-Atlantique. Alors que l'Europe s'épuise à réguler la *donnée*, le Chili a fait le choix audacieux de protéger la *source* (l'esprit). Par la loi n° 21.383 (2021), le législateur chilien a modifié l'article 19 de sa Constitution pour y graver la protection des «neuro-droits», en tranchant le nœud gordien de la qualification : *« Le développement scientifique et technologique sera au service des personnes et se réalisera dans le respect de la vie et de l'intégrité physique et psychique. La loi régulera les conditions, limitations et restrictions pour son utilisation chez les personnes, devant protéger spécialement l'activité cérébrale, ainsi que l'information qui en est issue. «*

La portée doctrinale est considérable : en distinguant l'activité (le processus) de l'information (la donnée) et en rattachant cette protection à l'intégrité physique plutôt qu'à la vie privée, le Chili offre le premier modèle de droit positif d'un véritable *Habeas Mentem*. Reste à déterminer si le droit européen saura, à son tour, opérer la mutation nécessaire pour placer l'intégrité de l'esprit au-dessus de la performance des corps.

II – Vers la consécration d'un *Habeas Mentem* social : pour une immunité cognitive du salarié

Portée par une synergie inédite entre juristes et neurobiologistes, l'idée d'un *Habeas Mentem*[56] dépasse la simple réflexion théorique pour appeler à une refondation normative. Elle postule la nécessaire sanctuarisation de l'intégrité cognitive par la consécration de droits fondamentaux nouveaux, capables de résister tant aux dispositifs actuels qu'aux ruptures technologiques imminentes[57].

[55] A. ROUVROY, T. BERNS, « Gouvernementalité algorithmique et perspectives d'émancipation », *Réseaux*, 2013/1, n° 177 : les auteurs développent le concept de « gouvernementalité algorithmique » où la donnée brute est perçue comme une vérité objective, dispensée de l'épreuve du contradictoire ;
[56] Trad. : « que tu disposes de ton esprit » ;
[57] L'essor des nanotechnologies et leur faculté à franchir la Barrière Hémato-Encéphalique (BHE) constituent un point de bascule. Les projets de « *neural dust* » ou de neuromodulation à distance préfigurent en effet une obsolescence de la distinction entre l'invasif et le non-invasif. En rendant possible, au-delà de la simple captation, une stimulation ciblée des neurones, ils ouvrent la voie à une écriture directe sur le support biologique ;

A. La reconnaissance de droits substantiels : ériger l'intégrité mentale en liberté fondamentale

1. L'alerte prémonitoire du Groupe Morningside : la convergence technologique comme risque systémique

Dès 2017, le Groupe Morningside[58] identifiait le péril né de la convergence neurotechnologies/IA, capable de décoder voire manipuler les mécanismes cérébraux. Transposée à la sphère laborieuse, cette perspective annonce une mutation de la subordination : l'employeur ne dirige plus seulement la force de travail, mais administre les processus cognitifs qui la génèrent.

Une menace insidieuse relevée par les auteurs concerne l'atteinte à l'imputabilité (*agency*). Face à des technologies agissant comme des « auto-correcteurs « de la pensée - traduisant une intention en action avant même que le sujet ne l'ait pleinement formulée, ou modifiant son comportement à son insu - la notion même d'auteur de l'action vacille. En droit du travail, si un dispositif « optimise « la décision, l'imputabilité de la faute disciplinaire et la nature *intuitu personae* du contrat sont remises en cause.

Sur le plan des données, le Groupe plaide pour une patrimonialité négative, calquée sur le régime des organes humains. Dans la relation de travail, asymétrique, le consentement est structurellement vicié ; un principe de non-partage par défaut (« *opt-out* «) apparaît dès lors comme un minimum vital pour éviter que le cerveau ne devienne un actif incorporel de l'employeur.

L'analyse met également en lumière le risque d'une « course aux armements « cognitive. L'introduction de technologies d'augmentation créerait une fracture entre salariés, redéfinissant la norme de l'aptitude et transformant le refus de l'augmentation en motif d'insuffisance professionnelle. De plus, l'incrustation de biais sociétaux dans les algorithmes risque d'objectiver scientifiquement le préjugé, parant l'exclusion des atours de la neutralité biologique.

Le constat juridique est sans appel, les auteurs appelant à la création de « neuro-droits « supranationaux qui invitent à dépasser la régulation technique pour opérer un saut qualitatif : passer de la protection de la donnée à la sanctuarisation de la personne, préfigurant l'*Habeas Mentem*.

[58] R. YUSTE, S. GOERING et al., « Four ethical priorities for neurotechnologies and AI », *Nature*, vol. 551, 9 nov. 2017, pp. 159-163 ;

2. Les hésitations liées aux premières formulations juridiques d'un *Habeas Mentem*

Si l'approche du Groupe Morningside ancre la nécessité de « neuro-droits « dans une perspective éthique et biomédicale, les travaux de Nita Farahany offrent une perspective complémentaire, juridique et politique. Dans *The Battle for Your Brain*[59], elle théorise la « Liberté Cognitive « non comme une simple extension de la vie privée, mais comme une mise à jour du droit à l'autodétermination. Là où Yuste dresse une liste de droits spécifiques, FARAHANY propose un droit-matrice englobant trois prérogatives : la confidentialité mentale, la liberté de pensée et l'autodétermination.

La nuance est fondamentale. L'approche de Yuste tend vers une sanctuarisation ontologique face au marché. Celle de FARAHANY, libérale, insiste sur l'autonomie individuelle, n'excluant pas l'amélioration cognitive. Toutefois, cette liberté théorique se heurte à l'asymétrie du monde du travail : la « liberté d'usage « citoyenne devient vite « contrainte d'usage « salariale, transformant l'autodétermination en fiction face au pouvoir de direction.

C'est dans l'entreprise que l'analyse percute. FARAHANY documente le glissement insidieux des logiciels de surveillance traditionnels vers la neuro-surveillance. Le droit du travail, construit sur la subordination des actes (le « faire «), est débordé par des dispositifs (EEG) contrôlant l'« être « ou le « ressentir «. Cette immixtion brise la frontière séculaire entre temps de travail et for intérieur. Elle décrit également un effet de « refroidissement « (*chilling effect*) : le salarié monitoré lisse ses pensées pour se conformer aux attentes de l'algorithme, créant un panoptique neuronal où toute dissonance cognitive devient suspecte. Dans cet environnement, la liberté d'expression au travail et le droit de retrait s'étiolent, car toute dissonance cognitive ou émotionnelle devient suspecte, voire sanctionnable en tant que « défaut de vigilance «.

Sur le plan procédural, la nature de la preuve neurale est décisive. FARAHANY distingue la preuve physique (contraignable, comme l'ADN) de la preuve testimoniale (protégée par le droit au silence). En droit positif, si le corps du salarié peut être contraint, son esprit est un sanctuaire. Or, la donnée neurale brouille cette *summa divisio*. Si elle révèle un contenu sémantique, elle doit constituer un « témoignage neuronal «. Son utilisation à charge contournerait le principe *nemo tenetur* en extorquant un aveu que la conscience refusait[60]. L'*Habeas Mentem* garantirait ici cette immunité procédurale, interdisant de transformer le cerveau en témoin hostile contre son propre sujet.

La « Liberté Cognitive « invite ainsi à redéfinir la dignité du travailleur pour garantir « le dernier refuge de la vie privée «. Sans cela, le contrat de travail emportera cession de l'intimité cognitive. L'*Habeas Mentem* trace la ligne rouge au-delà de laquelle la subordination devient servitude mentale.

---

[59] N. A. FARAHANY, *The Battle for Your Brain: Defending the Right to Think Freely in the Age of Neurotechnology*, St. Martin's Press, 2023 ;

[60] Cette distinction fait écho à la jurisprudence de la Cour européenne des droits de l'homme (CEDH, 17 déc. 1996, *Saunders c. Royaume-Uni*, n° 19187/91) qui différencie les éléments existant «indépendamment de la volonté du suspect » (sang, urine, ADN), qui peuvent être contraints, des éléments qui nécessitent une collaboration active (la parole). La donnée neurale signifiante, en ce qu'elle révèle un contenu de pensée, devrait logiquement basculer dans la seconde catégorie, bénéficiant ainsi de l'immunité ;

Au-delà de la doctrine, les institutions internationales investissent le champ. L'OCDE a ouvert la voie en 2019[61], privilégiant la gestion des risques et la *soft law*, mais laissant toutefois l'entreprise arbitrer entre sécurité et liberté.

Le Conseil de l'Europe[62], plutôt que de créer des droits *ex nihilo*, préfère pour sa part réactiver des droits existants (art. 9 CEDH, art. 3 Charte) en s'appuyant sur une partie de la doctrine européenne qui soutient que la liberté de pensée possède une dimension absolue interdisant toute ingérence[63]. L'*Habeas Mentem* ne serait donc pas une invention, mais la réaffirmation que le droit du travail ne peut franchir le seuil du for intérieur, transformant une liberté philosophique abstraite en bouclier procédural concret contre la preuve neuro-technologique.

L'UNESCO, enfin, tient une position plus radicale[64]. Alertant sur la « neuro-surveillance «, elle appelle à un nouvel instrument normatif en liant la protection des données neuronales à la dignité humaine, et ainsi évacuer le risque de marchandisation de l'expérience humaine.

Toutefois, l'idée de « neuro-droits « suscite une controverse féconde. Face aux tenants d'une spécificité neuronale plaidant pour des droits *ad hoc*[65], d'autres juristes alertent contre une « inflation des droits « [66]. Cette seconde école estime les concepts actuels (vie privée, intégrité) suffisants si le juge accepte de les adapter. Pour le droit du travail, le débat est pratique : faut-il attendre une convention internationale ou le juge peut-il, au nom de l'obligation de loyauté et du respect de la vie personnelle (art. L. 1121-1 C. trav.) ériger l'intégrité mentale en limite infranchissable ? L'*Habeas Mentem* est ici mobilisé pour trancher ce nœud gordien : offrir un principe directeur unifié guidant le juge tout en préparant les normes futures.

---

[61] OCDE, *Recommandation du Conseil sur l'innovation responsable dans les neurotechnologies*, OCDE/LEGAL/0457, adoptée le 11 déc. 2019 : l'organisation y définit neuf principes, dont la priorité à la sécurité, l'inclusivité et la protection de la vie privée cognitive, mais sans force contraignante pour les États membres ;

[62] Conseil de l'Europe (DH-BIO), *Plan d'action stratégique sur les droits de l'Homme et les technologies en biomédecine (2020-2025)*, 19-21 nov. 2019 ;

[63] J.C. Bublitz, « My Mind is Mine!? Cognitive Liberty as a Legal Concept », *Ontology Studies*, 2013, n° 13, p. 233 ; S. Ligthart, « Freedom of thought in the age of neuroscience », *Human Rights Law Review*, 2020 ;

[64] UNESCO, Comité international de bioéthique (CIB), *Rapport du CIB sur les enjeux éthiques des neurotechnologies*, SHS/BIO/IBC-28/2021/1, 2021 : le rapport qualifie les neuro-droits de « nouveaux droits humains » potentiels et alerte spécifiquement sur les risques de la « neuro-surveillance » et de l'exploitation des données cérébrales des travailleurs ;

[65] M. Ienca, R. Andorno, « Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology », *Life Sciences, Society and Policy*, vol. 13, n° 5, 2017 : les auteurs proposent la reconnaissance de quatre nouveaux droits : le droit à la liberté cognitive, le droit à la vie privée mentale, le droit à l'intégrité mentale et le droit à la continuité psychologique ;

[66] J. C. Bublitz, « Novel Neurorights: From Nonsense to Substance », *Neuroethics*, vol. 15, n° 7, 2022 *:* l'auteur dénonce explicitement le « rights inflationism » et le « neuro-exceptionalism » au motif que les concepts existants d'intégrité mentale et de liberté de pensée suffisent amplement, à condition d'être correctement interprétés par les juges ; S. Ligthart, *op.cit.* : l'auteur affirme que la protection absolue du *forum internum* (le droit de ne pas révéler ses pensées) contenue dans les textes actuels offre déjà le bouclier nécessaire contre la preuve neuro-technologique, rendant la création de nouveaux « neuro-droits » superflue ; S. Alegre, *Freedom to Think: The Long Struggle to Liberate Our Minds*, Atlantic Books, 2022 : avocate spécialisée en droits humains, elle soutient que plaider pour de « nouveaux » droits est dangereux car cela laisse entendre aux entreprises et États que le champ est actuellement libre tant que ces nouveaux droits ne sont pas votés ;

B. L'instauration de garanties fonctionnelles : la perspective d'une socialisation du pouvoir de direction

1. La socialisation du pouvoir de direction : l'accord collectif comme gardien du for intérieur

Si le contenu de l'*Habeas Mentem* — fondé sur le rejet d'une « transparence totalitaire « et la consécration d'un droit au « non-dit neuronal « — suscite moins de controverses que le choix de son véhicule normatif (*hard law* ou *soft law*), d'autres questions sont tout autant essentielles. L'enjeu névralgique consiste à extraire la surveillance cognitive du face-à-face asymétrique de la subordination pour la replacer au cœur d'une relation politique véritablement démocratique.

Car l'erreur serait de croire que la consécration de nouveaux droits fondamentaux suffit, à elle seule, à endiguer la puissance de la vague technologique. Le droit individuel pèse peu face à la rationalité économique et aux impératifs de sécurité. Il cède trop souvent devant un consentement individuel vicié par la dépendance économique, dont le RGPD lui-même reconnait la fragilité dans le contexte professionnel[67]. Pour que l'*Habeas Mentem* ne demeure pas une incantation éthique, il doit s'incarner dans une procédure de garantie collective, opérant le passage d'une protection passive du corps à une définition des normes de contrôle.

C'est ici que la philosophie que nous défendions dans une précédente analyse sur le rapport de subordination[68] prend tout son sens. Comme nous l'avons souligné, le lien de subordination ne doit plus être vécu comme une soumission féodale à un pouvoir potestatif, mais comme un cadre organisationnel dont les modalités d'exercice — surtout lorsqu'elles touchent à l'intime — doivent être débattues et validées collectivement. La neuro-surveillance, par sa violence intrusive potentielle, offre l'occasion historique de concrétiser ce changement de paradigme : le pouvoir de « lire « les cerveaux ne peut être qu'un pouvoir partagé, ou il sera tyrannique.

La première traduction de cette « socialisation « réside dans l'introduction des dispositifs. La consultation du CSE (art. L. 2312-8) étant insuffisante face à l'enjeu anthropologique - l'employeur, une fois la procédure purgée, reste seul juge de l'opportunité - l'introduction de neurotechnologies devrait être subordonnée à un accord collectif majoritaire, inversant la charge de la légitimité et érigeant la négociation en condition de licéité du traitement. L'accord d'entreprise ne serait plus une simple faculté d'adaptation, mais un verrou normatif absolu, garant de la nécessité et de la proportionnalité du dispositif. Cette « co-décision normative « permettrait de purger le dispositif de ses finalités les plus toxiques. La négociation collective deviendrait le lieu où s'élabore l'Analyse d'Impact relative à la Protection des Données (AIPD) et où se fixent les lignes rouges : interdiction du stockage des données brutes, anonymisation des retours d'expérience, effectivité d'un droit à la déconnexion du dispositif (art. L. 2242-17 C. trav. appliqué au neuronal).

Cette approche s'inscrit dans la droite ligne de l'évolution jurisprudentielle et législative récente qui, des Plans de Sauvegarde de l'Emploi (PSE) aux Accords de Performance Collective (APC), tend à doter l'accord majoritaire d'une présomption de justification. En

[67] Règlement (UE) 2016/679, considérant 43 : le texte énonce que le consentement ne constitue pas une base juridique valide « lorsqu'il existe un déséquilibre manifeste entre la personne concernée et le responsable du traitement », ce qui est la définition même de la relation salariale ;
[68] B. PETIT, « Libres propos sur le rapport de subordination dans les relations de travail : sortir du moralisme de la lutte des classes pour oser, demain, la co-gestion ! », *RDLF,* 2017, chron. 11 ;

matière de neuro-droits, l'accord collectif deviendrait le garant de la loyauté de la preuve. Il acterait le passage d'une subordination subie à une subordination négociée, où le travailleur accepte la surveillance non parce qu'il y est contraint par son contrat, mais parce que l'institution représentative du personnel en a validé l'utilité vitale et borné les contours algorithmiques.

Cette exigence de régulation conventionnelle n'est pas une utopie doctrinale. Elle s'inscrit dans le sillage de la prise de conscience amorcée par les partenaires sociaux, notamment dans l'Accord National Interprofessionnel (ANI) du 28 février 2020 portant diverses orientations pour les cadres. Ce texte soulignait déjà la nécessité de maîtriser les outils numériques pour éviter une « connexion subie ». L'*Habeas Mentem* ne fait que pousser cette logique à son terme juridique : il s'agit de protéger non plus seulement le temps de repos (droit à la déconnexion temporelle), mais l'espace de la pensée (droit à la déconnexion cognitive).

Toutefois, cette délégation de pouvoir à la négociation collective ne saurait s'analyser comme un chèque en blanc. L'accord majoritaire, s'il légitime le principe du déploiement, ne peut déroger à l'ordre public de protection. À l'instar de la jurisprudence sur les forfaits-jours[69], le juge devra exercer un contrôle strict sur les stipulations conventionnelles pour vérifier qu'elles garantissent effectivement la santé et le repos mental du salarié. Un accord qui validerait une surveillance neuronale continue sans « droit à la déconnexion cognitive » serait, par essence, nul et non avenu.

2. Le verrou épistémique : l'expertise algorithmique et la surveillance de la « boîte noire «

Toutefois, le verrou de l'accord initial ne suffira pas. La spécificité des neurotechnologies couplées à l'IA réside dans leur évolutivité intrinsèque (*machine learning*). Un algorithme de détection de la vigilance validé en 2025 peut, par une simple incrémentation en 2026, muter en outil de mesure de l'engagement émotionnel, sans modification du vecteur matériel. Ce risque de dérive fonctionnelle invisible, transformant un EPI en dispositif de contrôle de la charge mentale, impose un second verrou, de nature épistémique.

La co-gestion doit irriguer l'exécution du pouvoir de surveillance par un contrôle continu de la « boîte noire « algorithmique. Le CSE, ne disposant pas des ressources cognitives pour auditer le code, doit mobiliser l'expertise technique (art. L. 2315-94 C. trav.) non comme intervention ponctuelle, mais comme mécanisme récurrent d'audit. L'expert seul peut déconstruire l'architecture algorithmique pour vérifier l'absence de biais ou de détournement.

Ce contrôle technique doit se doubler d'une intermédiation sanitaire. Le médecin du travail et le SPST, érigés en « tiers de confiance « exclusifs (art. L. 4622-2 C. trav.), sont seuls légitimes à accéder aux données brutes, ne transmettant à l'employeur qu'une aptitude binaire qui préserve l'intimité physiologique. La CSSCT devient alors le point de jonction politique entre l'audit technique et l'alerte médicale pour questionner le pouvoir de direction.

Sans cette compétence et cette vigie sanitaire internalisée, le dialogue social resterait une fiction. L'*Habeas Mentem* exige que le collectif bénéficie du principe d'explicabilité garanti

[69] Cass. soc., 29 juin 2011, n° 09-71.107 : la Cour de cassation juge que toute convention de forfait en jours doit être annulée si l'accord collectif ne prévoit pas de modalités de suivi et de contrôle de la charge de travail de nature à garantir la santé et la sécurité du salarié. C'est ce contrôle de l'effectivité des garanties conventionnelles que nous proposons de transposer aux neuro-droits ;

par le droit européen[70]. Comprendre la grammaire intime de l'outil grâce à l'expert est la condition *sine qua non* pour éviter l'effet « boîte noire « où le salarié est jugé par un système dont personne ne maîtrise les ressorts.

Le corollaire est la sanction judiciaire. En cas d'opacité, le juge des référés doit pouvoir suspendre le dispositif. Plus encore, toute donnée issue d'un système non audité devrait être frappée d'irrecevabilité probatoire au titre de la déloyauté algorithmique[71].

Au terme de cette analyse, l'*Habeas Mentem* apparaît comme le sursaut nécessaire d'un droit du travail confronté à sa propre obsolescence. Tant que la subordination s'arrêtait aux portes de la conscience, le droit régulait les corps. Dès lors que la technologie franchit le mur de l'intimité pour auditer la pensée, le contrat social vacille.

Sauf à accepter tacitement l'avènement d'un travailleur transparent, dont la valeur se mesurera à l'aune de sa conformité neuronale, des scellés juridiques doivent être posés pour sauvegarder cette part d'ombre et de secret sans laquelle il n'est point de liberté, ni de dignité. Face à la transparence totalitaire de la machine, l'opacité cognitive du travailleur n'est pas une faute à corriger, mais le dernier bastion de son humanité à défendre.

[70] Ce principe découle de la combinaison des articles 13 à 15 du RGPD (droit à l'information sur la logique de la décision automatisée) et de l'article 13 du Règlement IA (UE) 2024/1689 qui impose une obligation de transparence et d'interprétabilité des sorties pour les systèmes à haut risque. Le CSE doit pouvoir accéder à cette « logique » pour exercer sa mission ;

[71] Cette sanction s'inscrirait dans la logique de la jurisprudence « Uber » (Cass. soc., 4 mars 2020, n° 19-13.316) où la Cour analyse le pouvoir de sanction algorithmique. Une preuve issue d'un algorithme dont le fonctionnement est opaque pour le salarié porte atteinte au principe de l'égalité des armes et au caractère contradictoire du procès (art. 6 CEDH) ;

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

Énergies marines renouvelables (EMR) : Optimisation hydrodynamique des hydroliennes et influence des fonds marins

Ferhat HADRI
Maître de conférences
UVSQ - LISV

Alina SANTA-CRUZ
Laboratoire des sciences appliquées de Cherbourg

Fatima KHALED
Laboratoire des sciences appliquées de Cherbourg

Résumé

Concernant les EMR (Énergies Marines Renouvelables), le fort potentiel énergétique des côtes françaises, porté par des courants de marée exceptionnels, offre des perspectives prometteuses, son exploitation se heurte toutefois à une bathymétrie particulièrement irrégulière (Fig.1). Les turbines hydro-cinétiques interagissent avec la turbulence complexe des fonds rocheux et sédimentaires à petite et grande échelles, un domaine encore peu exploré malgré l'intérêt scientifique qu'il suscite. C'est l'objet de cette étude.

Mots-clés

PIV, Impact environnemental, Multiphasique eulérien, Turbines hydro-cinétiques, Simulations numériques, OpenFOAM

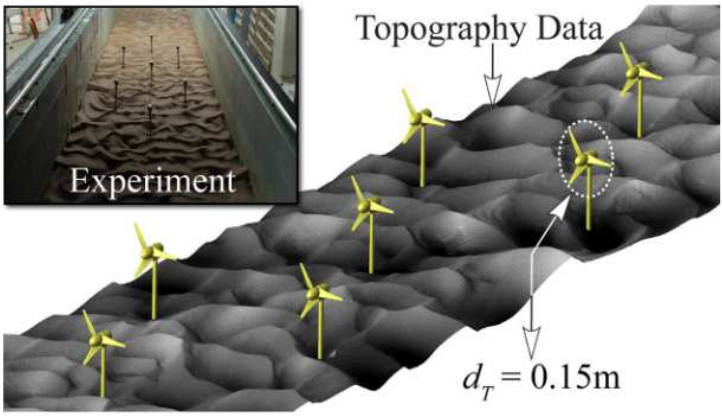
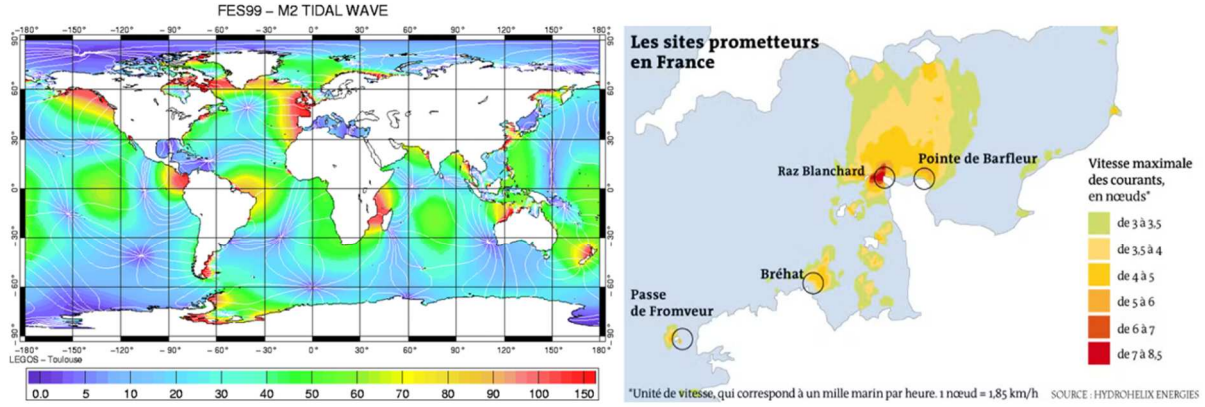


Fig.1 – Hydroliennes installées sur fond marins sableux irrégulier (HILL et al., 2014).

Introduction

Face à l'urgence climatique, la transition énergétique mondiale est devenue une priorité absolue. Alors que la consommation d'énergie primaire a quasiment triplé en cinquante ans, la part des sources décarbonées dans le mix énergétique global, et particulièrement en France, demeure encore insuffisante pour répondre aux objectifs de réduction des gaz à effet de serre. Dans ce contexte, l'exploitation des Énergies Marines Renouvelables (EMR) émerge comme une solution stratégique majeure. Même si plusieurs technologies coexistent pour capter les ressources océaniques telles que l'énergie houlomotrice, marémotrice, thermique ou osmotique, l'énergie hydrolienne suscite aujourd'hui un intérêt croissant. Contrairement à d'autres sources intermittentes, l'hydrolien se distingue par sa grande prévisibilité, liée aux cycles des marées, et par un impact visuel quasi nul puisque les turbines sont totalement immergées dans l'eau.

Malgré des défis technologiques existants, notamment la corrosion en milieu marin et les coûts de maintenance en haute mer, la filière hydrolienne française entre désormais dans une phase de maturité industrielle. Le potentiel national est estimé à environ 3 GW, concentré sur des sites stratégiques aux courants de marée intenses, tels que le passage du Fromveur ou le Raz Barfleur (Fig.2).



(a) Carte mondiale de la composante M2 des marées, générée par la «Lune moyenne». Deux lignes cotidales diffèrent d'une heure (LEGOS, Toulouse).

(b) Carte européenne de la vitesse maximale des courants marées.

Fig.2 – Vitesse des courants de marée dans le monde et en Europe([5], HYDROHELIX ENERGIES)

Le principe de fonctionnement d'une turbine hydrocinétique (hydrolienne) repose sur un principe similaire à celui des éoliennes. Alors que ces dernières captent l'énergie cinétique du vent, les turbines hydro-cinétiques utilisent le même procédé pour exploiter l'énergie cinétique des courants, tels que les courants de marée et les rivières. Étant donné que la densité de l'eau est environ 800 fois supérieure à celle de l'air, les turbines installées dans des zones à fort courant sont de taille plus réduite que les éoliennes de puissance équivalente.

La turbine reçoit l'énergie du courant et la transforme en mouvement mécanique, lequel est ensuite converti en énergie électrique. Les systèmes peuvent être maintenus à flot à l'aide d'un point d'ancrage ou placés sous la surface de l'eau. L'électricité produite est ensuite acheminée vers un réseau électrique donné. En fonction des besoins et des capacités d'installation, il est ainsi possible d'adapter la taille des turbines. Elles peuvent être des micro-générateurs pour de petites rivières ou des générateurs capables de produire plusieurs mégawatts pour des sites où le courant est particulièrement important, comme les rivières à

fort débit ou les sites de courants de marée. Elles peuvent prendre différentes formes : turbines à axe vertical ou horizontal (fig. 3), mais aussi dispositifs oscillants.

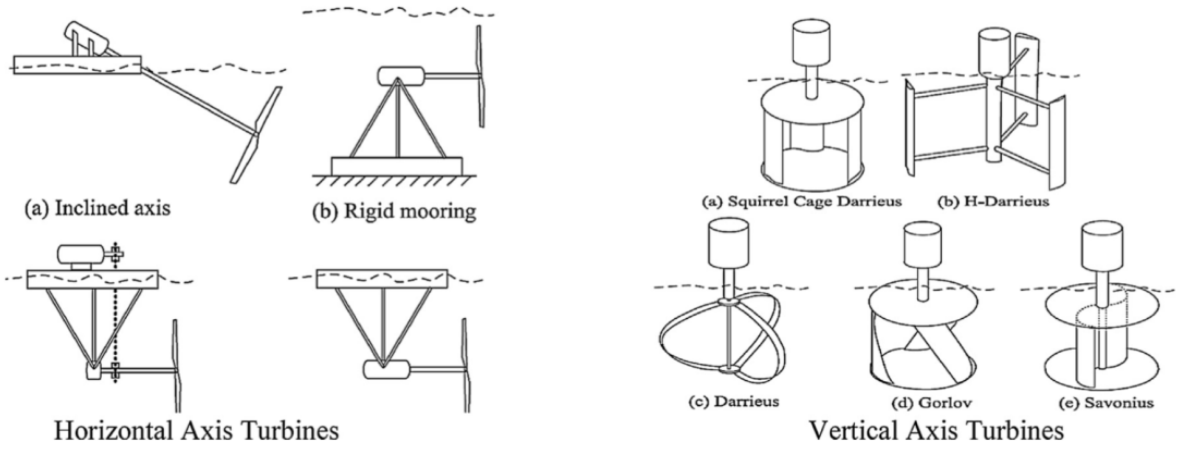


Fig.3- Différents types d'hydroliennes : à axe horizontal et vertical.

Interaction des hydroliennes avec le fond marin

L'implantation d'une hydrolienne repose sur une interaction dynamique et complexe avec les fonds marins, où la configuration du lit marin conditionne l'efficacité de la machine autant que celle-ci modifie l'équilibre sédimentaire. D'une part, la bathymétrie et la rugosité du fond (roches, dunes) sont déterminantes : elles peuvent soit booster le potentiel énergétique par effet Venturi, soit fragiliser la structure en générant des turbulences néfastes pour les pales. D'autre part, l'extraction de l'énergie cinétique par la turbine crée un effet de sillage qui ralentit le courant en aval, perturbant ainsi le transport naturel des sédiments [1, 2, 6, 7]. Ce phénomène se manifeste localement par l'affouillement (érosion au pied de la structure) et, à plus grande échelle, par une modification de la sédimentation globale, pouvant transformer durablement la morphologie côtière environnante. Cette contribution sera consacrée à l'interaction entre les turbines et le fond marin rocheux et sédimentaire.

Si plusieurs travaux se sont intéressés à l'affouillement généré par une turbine isolée [1, 7, 8], l'effet combiné d'un arrangement en réseau sur la dynamique du lit reste encore peu documenté [3, 11]. Les études récentes privilégient souvent des approches par simulation des grandes échelles (LES) [9, 10], très précises mais extrêmement coûteuses en temps de calcul, ce qui restreint l'exploration systématique de configurations spatiales. Le présent travail se positionne à l'interface de ces problématiques en proposant une modélisation paramétrique de deux turbines en tandem au-dessus d'un fond meuble, complétée par une caractérisation expérimentale (PIV) de la turbulence générée par un fond accidenté [5].

Méthode numérique

Dans cette approche, nous utilisons une classe sédimentaire unique (un sable de granulométrie uniforme) et deux turbines à axe horizontal soumises à un écoulement axial [6, 7, 8]. L'étude s'appuie sur quatre espacements axiaux distincts entre les turbines, notés A1, A2, A3 et A4. Quatre configurations différentes sont réalisées, pour lesquelles l'interaction de deux hydroliennes axiales, T1 et T2, est simulée dans chaque cas [3,4]. Les turbines sont placées l'une derrière l'autre axialement dans le canal. Une couche de sable est répartie uniformément

sur le fond du canal, sous les turbines. La distance axiale entre les turbines est le seul paramètre qui diffère entre les quatre configurations : elle est définie par x1=4d pour la configuration A1, x2=7d pour la configuration A2, x3=10d pour la configuration A3 et x4 =13d pour la configuration A4 (voir fig. 4), où d représente le diamètre de chaque turbine. Nous utilisons TSR=2,1 (Tip-Speed Ratio- rapport entre la vitesse tangentielle au niveau des pales et la vitesse des courants) et l'intensité de turbulence à TI=3 % comme conditions hydrodynamiques. Les pales sont modélisées à l'aide de 23 éléments discrets NACA 63418 répartis sur leur envergure, conformément au profil de pale choisi. De plus, le modèle de turbulence du fluide k−ϵ a été utilisé pour l'ensemble des configurations et un pas de temps de 10−3 s'est imposé pour optimiser la convergence.

La modélisation de l'écoulement repose sur le modèle de turbulence RANS standard k−ϵ au sein d'OpenFOAM. Comparativement aux méthodes LES ou hybrides RANS-LES (DES) employées dans la littérature récente [9, 10], qui nécessitent des ressources computationnelles massives, l'utilisation du modèle k−ϵ avec disques actuateurs discrétisés offre une alternative efficace et éprouvée [6] pour simuler le développement du sillage lointain et le transport sédimentaire sur des domaines étendus à un coût de calcul maîtrisé. Si cette approche tend à lisser certaines fluctuations turbulentes anisotropes au voisinage immédiat des pales, elle reproduit fidèlement les profils de vitesse axiale moyens et les gradients de cisaillement au lit conditionnant l'érosion.

Le domaine de calcul est un bloc de longueur a=4 m selon l'axe x, d'une profondeur de b=0.35 m selon l'axe y et d'une largeur de c=1 m selon l'axe z. Le disque de la première turbine, T1, est placé à 1,51 m en aval de l'entrée. Ainsi, celui représentant la seconde turbine T2 est situé à une distance di du premier disque (tableaux 1 et 2), telle qu'indiquée dans le tableau 1. Le maillage est généré à l'aide de blockMesh et est configuré comme un maillage hexaédrique de 60 millions de cellules.

a*b*c	d	x'	TSR	TI	U_∞
$4 * 0.35 * 1$ m	0.08 m	1.51 m	2.1	3%	0.8 m/s

Tableau 1 : Propriétés hydrodynamiques numériques pour les configurations A1, A2, A3 et A4 où a,b,c sont les dimensions du canal, x′ est la position de la première turbine, TSR, TI est l'intensité turbulente, est U∞ est la vitesse en amont de la turbine.

	A_1	A_2	A_3	A_4
x' (T_1)	1.51 m	1.51 m	1.51 m	1.51 m
x'' (T_2)	1.82 m	2.06 m	2.3 m	2.54 m
d_i	$4d$	$7d$	$10d$	$13d$

Tableau 2 : Propriétés hydrodynamiques numériques pour les configurations A1, A2, A3 et A4 où x′ et x″ sont respectivement les positions de la première et de la seconde turbine par rapport à l'entrée, et di est la distance inter-turbines.

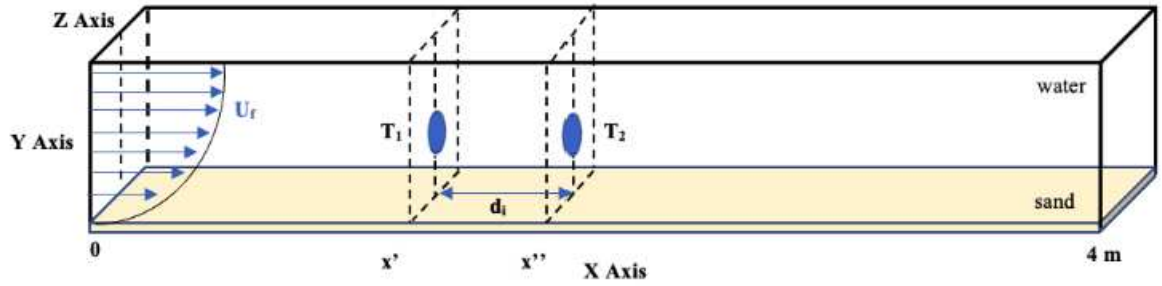


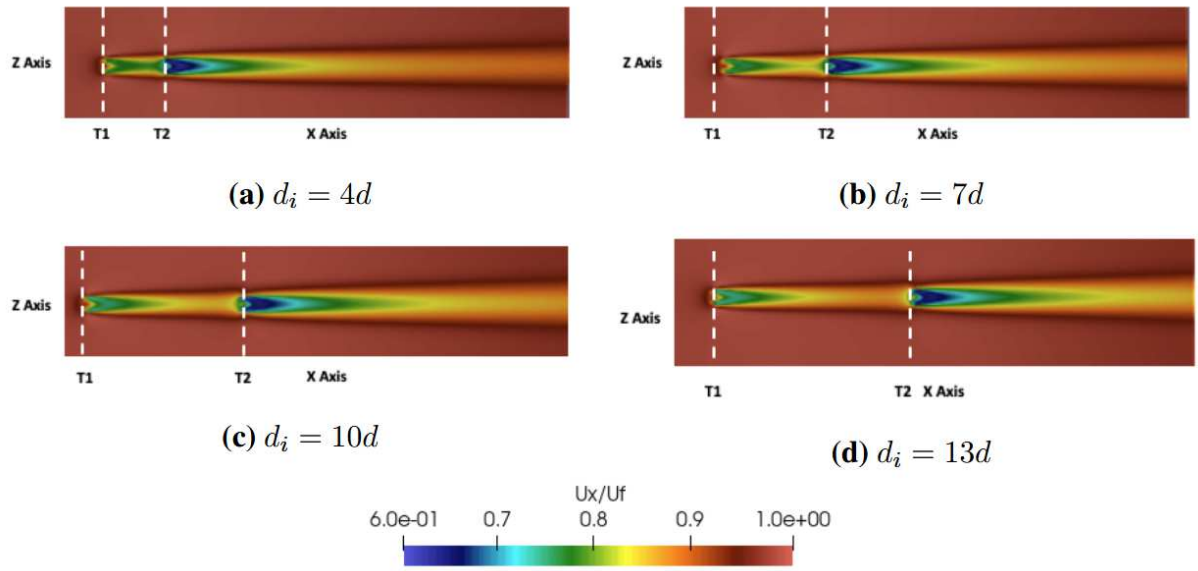
Fig. 4- Position des turbines (T1 et T2), profil logarithmique de la vitesse du fluide à l'entrée et couche de sédiments (sable) déposée sur le fond (illustrée en jaune). La variable di représente la distance inter-turbines (se référer au **Tableau 1**).

Résultats et Discussions des résultats de simulations :

La figure 5 présente les cartes de vitesse axiale entre les deux turbines en interaction. Le sillage derrière la turbine aval est modifié par l'influence de la turbine amont. Le déficit de vitesse en aval reste confiné dans une bande axiale, laquelle est légèrement plus large que celle observée derrière une turbine isolée. Le sillage semble également se résorber légèrement plus vite en termes de déficit de vitesse. La dégradation des profils de vitesse axiale est significative jusqu'à une distance de 2d en aval des turbines. Les profils de vitesse sous la première turbine (T1) sont similaires pour toutes les configurations de distances inter-turbines, puisque les vitesses en amont de T1 sont identiques ; cependant, ceux sous la seconde turbine (T2) varient.

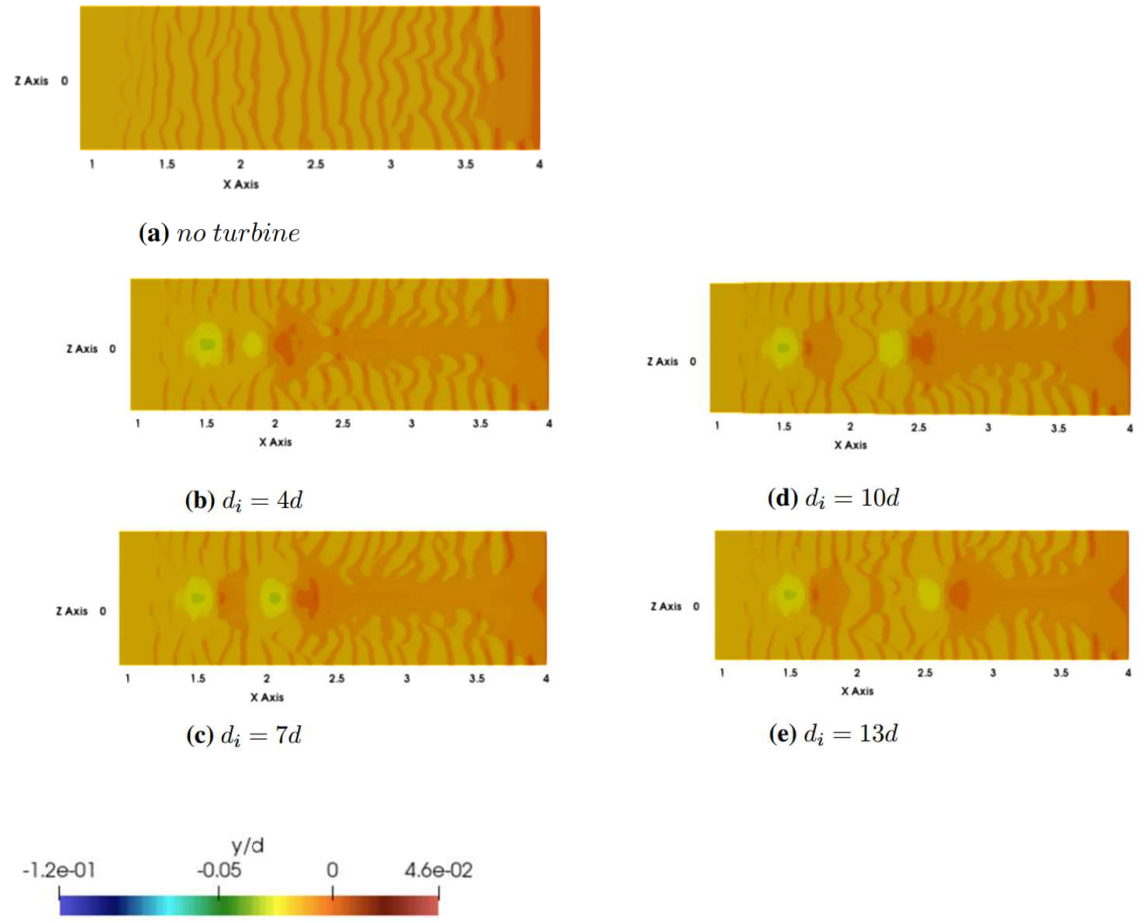
La figure 6 montre les modifications du lit sédimentaire dues à la présence des deux turbines T1 et T2 pour les configurations A1, A2, A3 et A4 (respectivement fig. 6.5b, 6.5c, 6.5d et 6.5e). L'impact des turbines sur la morphologie du lit est clair lorsque l'on compare les résultats avec le cas de référence, que ce soit pour l'élévation du lit (fig. 6) que pour le sillage en amont et aval de la turbine (fig. 5). Le trait le plus marquant est l'affouillement local (scour) sous chaque turbine, là où la contrainte de cisaillement est suffisamment élevée. On observe également la formation de deux corps sédimentaires importants en aval des turbines : l'un derrière T1 et l'autre derrière T2 pour chaque configuration, s'étendant tout le long de son axe dans le sillage lointain, là où la contrainte de cisaillement n'est plus aussi élevée qu'à proximité des turbines [9, 10, 11]. Cependant, la forme du lit sans les turbines est dominée par des rides de sable qui ne sont pas homogènes en raison de l'effet des parois du canal qui abrite les deux turbines.

La profondeur d'affouillement près de la première turbine est pratiquement la même pour les quatre configurations, mais on distingue une différence d'affouillement près de la seconde turbine, puisque la position de celle-ci varie considérablement selon les configurations (principalement dans la configuration A2, fig. 6.5c). Ainsi, plusieurs changements dans la morphologie du lit ont été constatés entre les configurations dans la zone comprise entre les deux turbines T1 et T2. Plus la distance entre les turbines di augmente, plus le lit évolue. Lorsque di=4d, T2 est suffisamment proche de T1 pour que la vitesse en amont de T2 soit la plus faible par rapport aux autres configurations ; cela rend le flux moins accéléré autour des pales, entraînant ainsi un affouillement moindre sous la seconde turbine.



(a) $d_i = 4d$ **(b)** $d_i = 7d$ **(c)** $d_i = 10d$ **(d)** $d_i = 13d$

Fig. 5- Influence des turbines sur le sillage en amont et en aval des turbines.



(a) *no turbine* **(b)** $d_i = 4d$ **(d)** $d_i = 10d$ **(c)** $d_i = 7d$ **(e)** $d_i = 13d$

Fig. 6 : Élévations normalisées du fond (y/d) avec et sans les turbines ; (a) cas de référence sans turbine, (b) di =4d,(c) di=7d, (d) di=10d et (e) di=13d à 60 s.

Étude expérimentale : Influence des obstacles de fond sur la turbulence

En complément des études numériques présentées précédemment, une campagne expérimentale par vélocimétrie par images de particules (PIV, Particle Image Velocimetry) a été menée afin de caractériser la dynamique de l'écoulement autour d'obstacles de fond (rochers, reliefs sous-marins ou structures anthropiques). Ces singularités topographiques perturbent l'écoulement incident en modifiant les profils verticaux de vitesse et en générant des structures tourbillonnaires ainsi que des zones de recirculation marquées [5]. Ces phénomènes dégradent le rendement hydrodynamique des hydroliennes et induisent des sollicitations mécaniques instationnaires susceptibles de nuire à leur durabilité. Couplée aux simulations numériques, cette analyse expérimentale vise à quantifier l'impact des fonds rocheux afin d'optimiser l'implantation des turbines et d'en accroître la fiabilité opérationnelle en conditions réelles. On considérant un écoulement homogène ayant un débit moyen mesuré au débitmètre de 0.300 m^3s^{-1}, ce qui donne en divisant par la surface de la section test (S=0.09m^2) une vitesse (U_∞ de 3.3 m^3s^{-1}). La figure 7 montre les résultats préliminaires obtenus de iso-surfaces de l'énergie cinétique turbulente (TKE) (définit comme : u =|u′²|, on constate une forte production de TKE juste à la surface supérieure de l'obstacle. Cela suit les expérimentations antérieures qui ont conclu à une création de la zone de cisaillement au niveau du coin amont supérieur du cylindre. C'est également de là que les tourbillons se produisent. Cette zone à forte densité d'énergie turbulente s'étire ensuite le long du sillage proche et lointain en aval. Ces mesures fournissent des données de calage indispensables pour guider l'implantation et le dimensionnement de parcs hydroliens sur des sites rocheux soumis à de forts courants de marée.

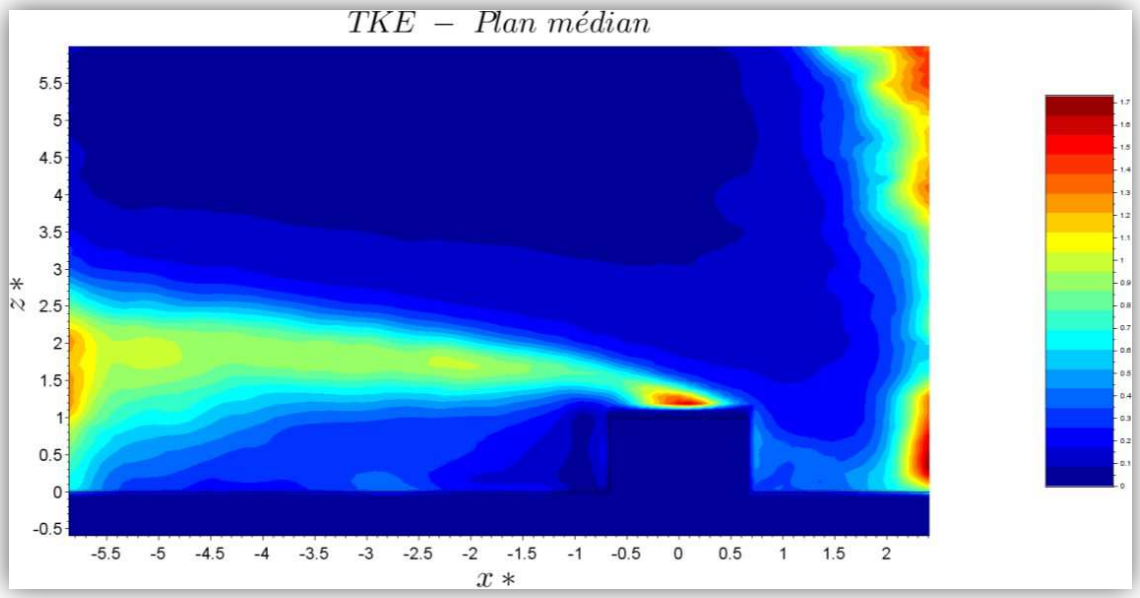


Figure. 7- : Énergie cinétique turbulente au-dessus d'un obstacle placé au fond du canal.

Conclusion

Cette étude a permis d'analyser l'influence de l'interaction entre deux hydroliennes sur les caractéristiques de l'écoulement et sur le transport sédimentaire en faisant varier la distance inter-turbines. Les résultats montrent que le sillage de la turbine amont modifie significativement les conditions hydrodynamiques rencontrées par la turbine aval. Cette

interaction se traduit par une altération de la distribution des vitesses et de la structure du sillage, dont l'intensité dépend directement de l'espacement entre les deux machines. Plus la distance inter-turbines augmente, plus le sillage récupère son énergie et plus l'influence de la turbine amont sur la turbine aval s'atténue.

L'étude met également en évidence un couplage étroit entre les interactions hydrodynamiques et l'évolution morphologique du fond. Pour toutes les configurations étudiées, un affouillement local se développe sous chaque turbine en raison des fortes contraintes de cisaillement générées à proximité des rotors, tandis que des zones de dépôt apparaissent dans les sillages aval. L'affouillement observé sous la première turbine reste pratiquement inchangé d'une configuration à l'autre, les conditions d'écoulement en amont étant identiques. En revanche, l'érosion sous la seconde turbine dépend fortement de sa position par rapport à la première. Parmi les cas étudiés, la configuration correspondant à une distance inter-turbines de 7d présente l'affouillement le plus important sous la turbine aval, atteignant des valeurs proches de celles observées sous la turbine amont. Ces résultats soulignent l'importance du choix de l'espacement entre les turbines lors de la conception des fermes hydroliennes. Au-delà de l'optimisation de la production énergétique, ce paramètre influence directement la stabilité du fond marin et les modifications morphologiques induites par l'exploitation de la ressource. Une meilleure compréhension des interactions entre sillages et transport sédimentaire apparaît donc essentielle pour assurer la durabilité et la performance des installations.

Enfin, les premiers travaux expérimentaux menés sur l'influence des obstacles de fond montrent la présence de zones de forte turbulence et d'importantes productions d'énergie cinétique turbulente dans leur sillage. La poursuite de cette étude permettra de mieux caractériser l'impact de la topographie des fonds marins sur le fonctionnement des hydroliennes et contribuera à optimiser leur implantation dans des environnements marins réels.

Références bibliographiques

[1] HILL C., MUSA M., CHAMORRO L.P., ELLIS C. and GUALA M., Local scour around a model hydrokinetic turbine in an erodible channel, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 140, n° 8, art. 04014037, 2014. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000898.

[2] LADOKUN L. , SULE B. , AJAO K. R. and ADEOGUN N., Resource assessment and feasibility study for the generation of hydrokinetic power in the tailwaters of selected hydropower stations in Nigeria, Water Science, vol. 32, n° 1, p. 39–54, 2018. DOI : 10.1016/j.wsj.2018.05.003.

[3] KHALED F., GUILLOU S., HADRI F. and MÉAR F., Effects of the spacing between two hydrokinetic turbines on the bedforms by numerical simulations, in Proceedings of the 15th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC), Bilbao, Espagne, 2023. DOI : 10.36688/ewtec-2023-554.

[4] KHALED F., GUILLOU S., MÉAR Y. and HADRI F., Numerical investigation of the local impact of hydrokinetic turbine on sediment transport — Comparison between two actuator models, European Journal of Mechanics - B/Fluids, vol. 102, p. 115–130, 2023. DOI : 10.1016/j.euromechflu.2023.07.003.

[5] SANTA-CRUZ A., COMBRET T., HADRI F. and GUILLOU S., Experimental characterisation of the wake of a bottom-mounted two tandem of cylinders placed in a high velocity area, in Proceedings of the 15th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC), Bilbao, Espagne, 2023. DOI : 10.36688/ewtec-2023-579.
[6] LAUNDER B. E. and SPALDING D. B., The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 3, n° 2, p. 269–289, 1974.
[7] MUSA M., HILL C. and GUALA M., Interaction between hydrodynamic wake and local scour downstream of a model tidal turbine under current and wave conditions, Coastal Engineering, vol. 138, p. 61–72, 2018.
[8] LIU R. et al., Local scour around tidal stream turbine foundations: A state-of-the-art review, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 13, art. 2376, 2025. DOI : [10.3390/jmse13122376].
[9] AKSEN M. M., SEYEDZADEH H., GHOLAMI ANJIRAKI M., CRAIG J., FLORA K., SANTONI C., SOTIROPOULOS F. and KHOSRONEJAD A., Large eddy simulation of a utility-scale horizontal axis turbine under live bed conditions, Renewable Energy, vol. 239, art. 122110, 2025.
[10] DENG X., LIN X., ZHANG J. and LIU S. « Coupled experimental-numerical analysis of energy harvesting dynamics of tidal stream turbine: Synergistic effects of operational status and morphological evolution in wave-current environments », Applied Energy, vol. 396, art. 124230, 2025. DOI : 10.1016/j.apenergy.2025.124230.
[11] ZHANG H. et al., Three-dimensional wake turbulence dynamics in staggered hydrokinetic turbine arrays, Renewable Energy, vol. 268, art. 124200, 2026.

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

7 REGARDS CROISÉS DES ACTEURS INDUSTRIELS DES TERRITOIRES

L'usine Stellantis Poissy, un exemple d'agilité et de résilience au service de la compétitivité durable

Éric HAAN

Directeur du site Stellantis de Poissy, dernière usine de production automobile en Île-de-France, avec près de 90 ans d'histoire. Après 20 ans dans le secteur automobile, il a pris la direction du site en début d'année 2026 pour engager une transformation industrielle visant à rendre le site plus performant et à garantir l'emploi industriel de demain. Il met l'accent sur l'ancrage territorial (emplois, partenariat avec collectivités, centres de formation...) et sur l'objectif d'adapter un site historique aux évolutions rapides de l'industrie automobile.



Propos recueillis par :
Guillaume MARTIN
Maître de conférences
UVSQ - LIMEEP-PS

G.M. *En vous appuyant sur votre parcours dans l'industrie :*
Quand on parle d'éthique et de soutenabilité des industries, de quoi parle-t-on vraiment ?

É.H. Tout d'abord, je pense qu'il faut avoir en tête que nos industries ont des vies tumultueuses quel que soit leur secteur d'activité. Elles évoluent et s'adaptent aux évolutions sociétales qui impactent leur carnet de commandes, mais aussi aux évolutions technologiques qui impactent la complexité de leur produit et transforment profondément leur process de production. Nous ne fabriquons plus aujourd'hui les voitures comme il y a 30 ans, et les voitures commercialisées aujourd'hui n'ont plus rien à voir avec les voitures d'il y a 30 ans.
Ensuite, nos industries reposent principalement sur les compétences et les savoir-faire des équipes qui la composent. Pour répondre au défi de l'adaptation, nos industries ont donc l'obligation de soutenir le développement des compétences de leurs équipes.
Enfin, nos industries s'adaptent et participent aux travaux de nos élus politiques pour faire évoluer les réglementations permettant d'avoir des produits et des process plus vertueux, en limitant leur impact environnemental par exemple, en améliorant la sobriété énergétique ou en renforçant la sécurité des usagers et clients de nos produits.
On voit donc que nos industries, et en particulier notre industrie automobile, sont mises au défi permanent de l'éthique et de la soutenabilité. Éthique vis-à-vis de la société qui est cliente de nos produits qui doivent être plus vertueux, éthique vis-à-vis de nos salariés qui aspirent à avoir de meilleures conditions de travail et à développer leurs compétences. Soutenable pour pouvoir survivre dans un environnement complexe et très dynamique.

G.M. Comment, de votre point de vue, ces notions se traduisent-elles dans la pratique ?

É.H. Dans la pratique, cela nécessite un pilotage à double focal.
Tout d'abord, être éthique et soutenable, avec la focale du quotidien, c'est veiller à ce que toutes les conditions soient réunies pour avoir une usine performante en sécurité et conditions de travail, en qualité du produit délivré pour satisfaire nos clients, en coût maîtrisé pour garantir l'équilibre économique de nos activités. À la maille quotidienne, cela signifie identifier et corriger toute anomalie pouvant générer un désagrément pour nos salariés, un risque pour leur sécurité, un risque pour la qualité de nos véhicules produits ou un risque pour notre capacité à réaliser la production dans la bonne quantité dans le délai imparti. Pour y parvenir, tout le management de l'usine est mobilisé pour identifier ces risques, écouter nos salariés et avoir les instances de pilotage permettant de faire les corrections au bon niveau avec la meilleure réactivité. C'est souvent la première approche qu'ont nos visiteurs, une usine tranquille où chacun accomplit sa tâche et où une voiture sort de nos lignes toutes les 2 minutes, toujours au bon tempo. Mais, derrière cette apparente tranquillité, il s'agit avant tout de maîtrise, avec une grosse machine qui mobilise énormément de managers sur le terrain, du premier niveau jusqu'au directeur du site industriel.
Ensuite, la seconde focale concerne la préparation de notre outil industriel à moyen et long termes. Cela signifie identifier les évolutions produit des véhicules issus de nos chaînes de production à préparer et identifier les innovations process à intégrer dans notre usine pour rester performant. Ces orientations et décisions sont prises entre 1 et 2 ans avant leur implantation sur le terrain dans notre usine. Pour les compétences, nous regardons même sur un horizon 3 à 5 ans en fonction des compétences critiques qui pourraient nous quitter et qu'il faut remplacer, avec la bonne montée en compétence technique sans négliger le temps d'apprentissage par l'accumulation d'expérience sur le terrain. De manière concrète, ces décisions sont intégrées dans un plan d'exécution qui est piloté chaque semaine et actualisé au moins une fois par an.
L'éthique et la soutenabilité, c'est donc un enjeu du quotidien en réactivité et un enjeu stratégique qui se prépare plusieurs années à l'avance. C'est grâce à ce pilotage à double focal que nos usines sont résilientes et que notre industrie se pérennise.

G.M. Le site de Poissy a presque 90 ans d'histoire. Comment associer salariés, collectivités et partenaires locaux dans les choix industriels qui détermineront son avenir ?

É.H. En effet, le site de Poissy a été inauguré en 1938 et fêtera ses 90 ans en 2028 après avoir produit des véhicules de marques iconiques telles que Ford, Chrysler, SIMCA, Talbot, Peugeot, Citroën, DS automobiles ou Opel / Vauxhall.
Cette longévité est le fruit d'une collaboration forte avec nos salariés, avec les acteurs économiques et politiques locaux pour permettre à notre usine de se transformer et de s'adapter au contexte actuel.
Cette année 2026 marque un jalon important dans l'histoire de notre usine, car nous avons construit et partagé l'avenir de notre site industriel. Cet avenir sera mis en œuvre à travers un plan de transformation majeure de 5 ans, avec plus de 100 millions d'euros investis pour changer la vocation même de notre usine.
Cette transformation est nécessaire car les attentes concernant l'industrie automobile ont profondément changé.

Tout d'abord, le marché de véhicules neufs en Europe a chuté de 20 % depuis 2019, année du COVID. Cette baisse des ventes de véhicules neufs a de multiples causes : efficience de l'offre de transport public avec une population de plus en plus urbaine, le prix d'achat des véhicules qui a augmenté avec un enrichissement produit exigé par la réglementation, l'élongation de la durée d'usage des véhicules, le développement de la conscience environnementale de nos clients.
Cette évolution de notre terrain de jeu s'impose à toute l'industrie et nécessite des décisions pour nous adapter à cette nouvelle réalité. L'usine de Poissy est le fer de lance de cette évolution pour STELLANTIS. Notre nouvelle vocation répond au contexte de notre industrie, il a été co-construit avec nos partenaires locaux et nos partenaires sociaux.
Cela nécessite un dialogue exigeant pour partager avec transparence l'évolution du contexte de notre industrie, pour identifier nos forces et faiblesses. Ce dialogue est nécessaire pour saisir les opportunités d'activité qui permettront de construire un futur pérenne pour notre usine et nos salariés.

G.M. *Dans un secteur en pleine mutation, comment un site comme Poissy peut-il devenir un modèle d'industrie à la fois compétitive, innovante et soutenable ?*

É.H. Je suis convaincu qu'un site comme Poissy peut devenir un modèle d'industrie compétitive, innovante et soutenable en redéployant et en approfondissant ses compétences industrielles, car nos compétences sont nos actifs les plus précieux ; il faut les préserver et les développer.
Ce redéploiement doit s'orienter sur des activités qui correspondent aux nouvelles attentes de nos clients : production de pièces de rechange d'origine pour allonger la durée de vie de nos véhicules, reconditionnement de pièces de rechange pour offrir une seconde vie à ces pièces et développer une offre alternative pour l'après-vente, transformation de véhicules neufs pour des usages loisirs ou professionnels.
Enfin, notre proximité des centres R&D de STELLANTIS, avec près de 9 000 ingénieurs aux portes de notre usine, dans une région dynamique avec écoles et start-ups, doit nous permettre de devenir un centre d'innovation pour les nouvelles technologies de production : contrôle par vision, déploiement de l'IA, production en impression 3D… *« Au-delà des défis, qu'est-ce qui marche aujourd'hui dans l'industrie ?*

G.M. *Comment transmettez-vous aux jeunes générations l'idée que l'industrie peut être à la fois innovante, compétitive et porteuse de sens ?*

É.H. Pour tous les objets, du plus simple au plus complexe, du plus rare au plus usuel, il y a une industrie qui a réfléchi à la manière la plus efficiente et la plus adaptée de les produire. Une société qui ne produit pas et qui importe tout est une société qui n'a plus son destin en main, c'est donc un enjeu de souveraineté nationale. La compétition internationale doit nous stimuler et nous aider à dépoussiérer la vision ancienne et sale de l'industrie de nos grands-parents. Aujourd'hui, l'industrie est mise au défi tous les jours, avec de l'innovation à tous les étages et le besoin grandissant de talents prêts à s'épanouir dans un environnement stimulant pour répondre à tous les besoins de la société, ceux d'aujourd'hui comme ceux de demain !

G.M. *« Si vous deviez imaginer l'industrie en 2030, à quoi ressemblerait une industrie à la fois compétitive, éthique et soutenable ? »*

É.H. L'industrie en 2030 doit être agile, flexible et pilotée. Dans un contexte où les changements s'accélèrent, notre industrie doit être capable de s'adapter avec une grande réactivité, tout en respectant le cadre réglementaire, le cadre environnemental et le cadre imposé par nos clients dont les préoccupations ne sont pas toutes transposées en lois. L'industrie sera donc probablement composée de procédés agiles, flexibles, rapidement adaptables et personnalisables avec un pilotage assisté par IA pour épauler les managers et conducteurs d'installations. Le temps de développement du concept jusqu'à la mise en production sera infiniment raccourci pour coller au plus près des attentes de nos clients. Les outils pour y parvenir sont déjà là, et la course est déjà lancée !

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

Incubation d'un projet industriel sur le territoire : lien avec la recherche appliquée et la formation

Présentation

L'assistance à la mobilité des personnes en situation de handicap : un enjeu humain, médical et sociétal

L'assistance à la mobilité des personnes en situation de handicap et de leurs accompagnants constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour notre société. Cette problématique revêt une importance croissante dans un contexte de vieillissement démographique, qui s'accompagne généralement d'une diminution des capacités de déplacement autonome et d'une augmentation des besoins en matière d'assistance à la mobilité.

En France, environ un million de personnes utilisent un fauteuil roulant mécanique, de manière temporaire ou permanente. Cette population est estimée à près de 7 millions de personnes à l'échelle européenne et à environ 130 millions à l'échelle mondiale. Les utilisateurs de fauteuils roulants mécaniques peuvent rencontrer des difficultés importantes pour se déplacer de manière autonome dans les espaces publics. Ils sont alors susceptibles de recourir à l'aide d'un accompagnant, notamment lors de déplacements en dehors du domicile, dans les établissements de soins ou au sein d'espaces accueillant du public.

Le déplacement en fauteuil roulant mécanique peut représenter une sollicitation physique importante, tant pour les utilisateurs que pour leurs accompagnants. Les efforts nécessaires à la propulsion, à la manœuvre et au franchissement de certaines contraintes environnementales peuvent être particulièrement exigeants, notamment lors de déplacements fréquents, sur de longues distances ou dans des espaces présentant des dénivelés. La répétition de ces sollicitations physiques est susceptible d'engendrer une fatigue significative et de favoriser l'apparition de troubles musculosquelettiques (TMS), pouvant s'inscrire dans la durée et affecter la santé ainsi que la qualité de vie des personnes concernées.

Les proches aidants, les professionnels du secteur médico-social et les personnels intervenant dans des espaces accueillant du public, tels que les aéroports, figurent parmi les personnes particulièrement exposées à ces contraintes. L'amélioration des dispositifs d'assistance à la mobilité apparaît ainsi comme un enjeu à la fois humain, médical et sociétal. Elle vise à faciliter les déplacements des personnes en situation de handicap, à renforcer leur autonomie et leur participation sociale, tout en réduisant les contraintes physiques et les risques de troubles musculosquelettiques pour leurs accompagnants.

Les solutions technologiques développées par Aurizeo

Afin de répondre à ces enjeux, l'entreprise Aurizeo développe des solutions technologiques simples d'utilisation, inclusives et destinées à préserver la santé et améliorer le quotidien des personnes en situation de handicap et de leurs accompagnants.

La première solution, **Handinaute Solo**, consiste en un module de traction électrique reposant sur le principe « Plug & Roll ». Ce dispositif permet à l'utilisateur de se déplacer avec un effort physique réduit, sans nécessiter ni installation permanente ni modification de son

fauteuil roulant mécanique. Cette solution, conçue et assemblée en France, est facile à utiliser, compatible avec les différents modèles de fauteuils roulants mécaniques et destinée à un usage multi-utilisateur en étant proposée en libre accès dans des lieux publics.

Handinaute Solo facilite ainsi les déplacements du quotidien et contribue à renforcer la liberté de mouvement, l'autonomie et la participation sociale des personnes en situation de handicap moteur. En proposant une assistance motorisée adaptable aux fauteuils existants, le dispositif vise à rendre la mobilité plus accessible, tout en limitant les contraintes liées à la propulsion manuelle.

La deuxième solution, **Handinaute Duo**, est un pousseur motorisé universel, également conçu selon le principe « Plug & Roll ». Il permet à un accompagnant et à un utilisateur de fauteuil roulant mécanique de se déplacer conjointement, en réduisant fortement les efforts physiques nécessaires à la propulsion et à la conduite de l'ensemble.

Le dispositif est conçu pour prendre en charge l'accompagnant et s'assembler automatiquement au fauteuil roulant mécanique de l'usager. Une fois connecté, il permet de propulser l'ensemble grâce à une motorisation électrique, offrant ainsi une assistance adaptée aux déplacements à deux. Handinaute Duo apporte une réponse aux contraintes physiques rencontrées par les accompagnants, notamment dans les situations de déplacement fréquentes ou prolongées, tout en améliorant le confort et la mobilité des utilisateurs.

À travers ces deux solutions complémentaires, Aurizeo contribue au développement d'une mobilité plus inclusive, en associant innovation technologique, simplicité d'utilisation et prévention des risques liés aux sollicitations physiques. Son approche vise à favoriser l'autonomie des personnes en situation de handicap tout en améliorant les conditions d'accompagnement dans les environnements du quotidien.







Laurent LAPIERRE

Fondateur de Aurizéo

Propos recueillis par :

Yamina SEHIL

PRAG à l'IUT de Mantes-en-Yvelines

Résumé

La start-up Aurizeo correspond à une innovation à la fois en matière de lien entre la formation puisqu'elle accueille un étudiant de BUT Génie Industriel et Maintenance comme apprenti, et la recherche appliquée via l'accompagnement de Sébastien CHARLES, Maître de conférences au LISV (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles), rattaché à l'IUT de Mantes-en-Yvelines. Ses liens avec l'IUT relèvent de l'incubation puisque Aurizeo grandit en partie en son sein. Aurizéo correspond aussi à une voie dans laquelle nous aimerions davantage nous engager dans le département Génie Industriel et Maintenance.

Aurizeo est aujourd'hui un partenaire de notre IUT, dans la recherche, la formation d'un de nos étudiants mais aussi en apportant son expertise et expériences lors des événements recherches que nous organisons (colloques, Ecospace...) et de sensibilisation au handicap (journées inclusion des TC notamment).

Mots-clés

Recherche appliquée ; incubation ; formation ; plateforme de transfert de technologie

Y.S. *Présenter vous-même ainsi que Aurizéo, ce qu'elle représente aujourd'hui en termes d'activités : secteurs, effectifs, organisation, production et perspectives de croissance et évolutions.*

L.L. Je suis Laurent LAPIERRE, 61 ans, ingénieur informatique. J'ai fait ma carrière dans les grandes sociétés informatiques et ai eu quelques expériences en tant que freelance. Je suis devenu paraplégique à la suite d'un accident de voiture en juin 2017. À la suite de quoi j'ai passé un an en rééducation aux Invalides, pour apprendre à vivre au quotidien avec le handicap. Parmi mes expériences marquantes, on peut parler de faire ses courses et se déplacer à l'extérieur. Le moindre obstacle est un problème et c'est plus fatigant que la marche à pied.

De nature curieuse et d'esprit entrepreneurial, j'ai rapidement identifié qu'il n'existait pas de solutions pour aider dans les lieux publics aux déplacements et au shopping, notamment pour porter des courses. J'ai commencé à imaginer des solutions qui pourraient combler ce vide et l'idée de l'Handinaute a commencé à naître.

C'est à l'occasion d'un appel à projets du SQYCUB, l'incubateur de Saint Quentin en Yvelines, que tout s'est concrétisé. À la suite d'un pitch devant un jury, nous avons intégré la promo 2021-2023 du programme d 'accompagnement.

La SAS AURIZEO a été créée en septembre 2022, notamment pour bénéficier d'une subvention Innov'Up de la région IDF. S'en sont suivis trois ans de conception et de tests pour arriver à début 2026, date de début de commercialisation.

Nous sommes 4 associés, dont Sébastien CHARLES, nous avons un responsable production en CDI et deux alternants. Nous avons comme clients l'agglomération de Lorient, l'Espace Saint-Quentin et nous discutons avec un grand groupe de distribution pour implanter des Handinautes dans ses magasins.

Nous voulons faire de Aurizeo un leader du monde de la mobilité inclusive sur le marché français et européen, voire au-delà.

Y.S. *J'aimerais avoir votre point de vue sur la plus-value de cette « incubation » ou lien avec notre IUT pour votre projet. Comment ce lien est-il né ? comment a-t-il évolué ? comment vous le voyez ou vous aimeriez qu'il évolue ? du point de vue des différents axes de développement de votre activité : conception des produits, développement technologique, promotions de vos activités... Que peuvent apporter l'Université et l'IUT à une start-up technologique ?*

L.L. C'est en cherchant des compétences mécaniques et électroniques que j'ai contacté l'IUT de Mantes 2021 par un mail envoyé à Sébastien CHARLES. Il a tout de suite adhéré au projet. On a beaucoup discuté, il a réalisé un prototype en bois rapidement. Cela nous a permis de concrétiser le concept. Nous avons pris Maxime ROUSSINEAU en septembre 2023 pour participer à la conception et à la réalisation de notre Handinaute.

Je crois beaucoup dans la collaboration Ecole-Entreprise. Chacun bénéficie de l'autre :

- l'entreprise accède à des savoirs de haut niveau pour ses activités de R&D

- l'école bénéficie de projets concrets qui vont être mis sur le marché, avec l'obligation de garantir : coûts, qualité, maintenabilité...

Les étudiants bénéficient également de l'immersion dans des projets concrets. Notre cas est un peu particulier car nous créons tout en même temps : l'entreprise et le produit. Nous n'avons donc pas beaucoup de temps à consacrer à l'encadrement. Il faut donc trouver des étudiants très autonomes. Mais l'avantage c'est que l'entreprise va grandir et donc des possibilités d'embauche sont possibles.

Il faut donc que les écoles se fassent connaître auprès des lieux dans lesquels les startups se créent, par exemple le SQYCUB. Des présentations de vos savoir-faire réguliers pourraient être appréciées, des visites chez vous également. Cela vous informerait également des sujets dans lesquels les startups se créent, et donc peut être pouvoir influencer le contenu des cours ou TP.

Y.S. Comment un établissement comme le nôtre pourrait s'insérer dans un écosystème d'incubation et accompagnement déjà riche via un positionnement axé sur la recherche et la formation ? Vous avez sans doute une très bonne connaissance de tous les organismes et outils qui existent localement pour vous aider à développer vos projets technologiques, donc l'idée serait d'imaginer comment notre IUT pourrait se développer dans cet écosystème ? A quoi ressemblerait l'IUT idéal de ce point de vue ?

L.L. Le département des Yvelines est très riche sur le plan de la création de startups, les organismes auprès desquels il faudrait vous faire connaître ; La French Tech Paris-Saclay, le SQYCUB, IncubAlliance, Le Réseau Entreprendre Yvelines...

Il faut développer les échanges avec ces organismes. Aujourd'hui, les grandes écoles sont présentes, mais moins les filières universitaires. Il faut donc que l'IUT se positionne comme un partenaire et/ou un prestataire qui peut aider les startups technologiques à se développer. Et en même temps être un vecteur d'intégration des étudiants dans de vrais projets.

L'alternance est un bon outil pour cela, mais peut-être pas le seul. Par exemple, les professeurs, les chercheurs pourraient être des ressources très utiles aux entreprises.

En résumé, il faut encore plus inclure l'IUT et le positionner comme un partenaire des startups. La connaissance académique très pointue des enseignants/chercheurs peut être un fer de lance pour alimenter des idées innovantes, proposer des solutions. À l'heure de la souveraineté industrielle, il faut que toute la société se mobilise et l'IUT en fait partie. Tout ce savoir accumulé doit aussi bénéficier aux startups.

Et bien sûr former nos jeunes, pour l'avenir de notre pays est fondamental.

Formons des équipes pluridisciplinaires : startups, enseignants chercheurs, étudiants, département, agglos... Et alors tout le monde sera gagnant !

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

8 RUBRIQUE REVUE DE THÈSE / PROJETS DE THÈSE / JEUNES CHERCHEURS

Quelles performances des exploitations agroécologiques en grandes cultures ?



Elise YGAUNIN
Doctorante en agronomie
UMR SADAPT
INRAE

Maude QUINIO
UMR SADAPT
(INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay)



François COLÉNO
Directeur de recherche INRAE
UMR SADAPT
(INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay)



Aude BARBOTTIN
PhD
Chargée de Recherche
UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, université Paris-Saclay

Résumé

La transition agroécologique constitue une voie d'évolution des systèmes agricoles visant notamment à réduire l'usage des produits phytosanitaires. Si de nombreux travaux portent sur la conception de systèmes de culture agroécologiques et d'itinéraires techniques mobilisant des pratiques agroécologiques, peu analysent comment ces pratiques s'inscrivent dans les stratégies des agriculteurs. À partir de quinze entretiens libres auprès d'agriculteurs en grandes cultures, nous avons caractérisé leurs finalités et les stratégies mises en œuvre, ainsi que la place de l'agroécologie dans celles-ci. L'analyse a mis en évidence une diversité de pratiques agroécologiques, portant sur des éléments techniques d'une culture, du système de culture ou au niveau du paysage. Cinq finalités à l'échelle des exploitations agricoles ont été identifiées : la viabilité économique ; la réappropriation du métier d'agriculteur ; la transmission de l'exploitation ; la préservation de l'agroécosystème ; l'autonomie en matière de gestion du parc matériel. Nos travaux montrent que les pratiques agroécologiques s'inscrivent à différents degrés dans les stratégies : elles peuvent constituer une finalité en soi, une orientation stratégique ou encore être mobilisées comme des moyens au service de celles-ci. Ce travail met en évidence que l'agroécologisation des exploitations agricoles ne peut se penser indépendamment de la logique et du raisonnement dans lesquels elles s'inscrivent.

Mots-clés

Pratiques agroécologiques, stratégie de gestion, exploitation agricole, étude de cas

Introduction

L'agriculture est un secteur au cœur d'enjeux politiques, économiques et sociaux. Les crises récentes ont mis en évidence la nécessité de repenser les systèmes agricoles et alimentaires afin de les rendre plus autonomes et durables. Sous l'impulsion d'injonctions sociales et institutionnelles, les agriculteurs sont amenés à réduire l'utilisation d'intrants de synthèse (engrais azotés et pesticides) tout en combinant performances économiques, environnementales et sociales. Afin de répondre à ces enjeux, l'évolution des pratiques et des territoires, selon les principes de l'agroécologie, est mise en avant. Cette approche systémique et transformationnelle vise la reconfiguration profonde des systèmes agricoles et alimentaires, afin de préserver les ressources et d'améliorer le bien-être humain (GLIESSMAN, 2018 ; WEZEL et al., 2009). La notion d'agroécologie est polysémique et intègre différents champs disciplinaires : économie, politiques, sciences sociales, écologie, biologie ou encore agronomie (TERAN-SAMANIEGO et al., 2025; TICHIT & DUMONT, 2016). Lorsqu'elle est mobilisée dans sa dimension technique, l'agroécologie consiste à développer des systèmes de production agricole valorisant les processus naturels et le bouclage des cycles biogéochimiques (ex. bouclage des flux d'azote, équilibres biologiques entre les ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels qui les régulent) (WEZEL et al., 2009).

La plupart des travaux portant sur l'agroécologisation des exploitations agricoles se concentrent sur l'insertion d'une innovation technique ou sur la transition vers un modèle de production (généralement l'Agriculture Biologique, qui proscrit l'utilisation d'intrants de synthèse) sans prendre en compte la combinaison des leviers agroécologiques mobilisés par les agriculteurs (TITTONELL, 2020). Pourtant, la transition agroécologique entraîne des transformations parfois profondes de l'exploitation agricole, des réseaux d'acteurs dans lesquels elle s'inscrit, des opérateurs économiques de la chaîne de valeur et des acteurs publics (COQUIL et al., 2018; RUNHAAR, 2021), ainsi que des connaissances mobilisées par les agriculteurs (GIAGNOCAVO et al., 2022; TOFFOLINI et al., 2016).

L'adoption de pratiques agroécologiques repose sur des choix adaptés aux contextes et aux finalités de l'exploitation (DURU et al., 2015; WEZEL et al., 2014). Elle s'accompagne également d'une évolution des orientations stratégiques de celle-ci (DUVAL et al., 2021; LITHOURGIDIS et al., 2011; VERKUIL et al., 2024; VIGUIER et al., 2021), et des valeurs portées par les agriculteurs (HAZARD et al., 2022). L'agroécologisation des pratiques agricoles ne peut donc pas être analysée indépendamment des stratégies mises en place par l'agriculteur.

À l'échelle des exploitations agricoles, la stratégie peut être définie comme l'ensemble des décisions et des actions par lesquelles l'agriculteur détermine les finalités et les orientations stratégiques de l'exploitation, les moyens mobilisés pour les atteindre, ainsi que les conditions et les indicateurs retenus pour en évaluer les résultats (FEISTHAMMEL & MASSOT, 2005; HEMIDY et al., 1993). Dans cette perspective, les orientations stratégiques renvoient à la combinaison d'objectifs, de moyens et d'actions mises en œuvre dans l'utilisation de ces moyens, afin de contribuer aux finalités poursuivies par l'exploitation (GUICHARD et MICHAUD, 1994 ; MINTZBERG, 1999). La stratégie ne se limite donc pas aux choix techniques, mais intègre également les dimensions économiques, organisationnelles et environnementales qui structurent le fonctionnement de l'exploitation. Les travaux s'intéressant aux approches stratégiques des exploitations agricoles sont peu nombreux et

s'adressent généralement aux outils pour les qualifier (CAPITAINE et al., 2013) ou à des stratégies particulières, telles que la diversification des ateliers (GAFSI, 2017).

Au-delà des travaux portant sur les pratiques agroécologiques et leur intégration technique dans les systèmes de culture, ceux portant sur l'exploitation agricole restent encore peu nombreux. Ils s'adressent aux types d'insertion de pratiques agroécologiques au sein d'exploitations agricoles, selon leurs profils technico-économiques (FANCHONE et al., 2020), ou aux facteurs d'évolution des systèmes sociotechniques, afin de favoriser la transition agroécologique (RUNHAAR et al., 2020; RYSCHAWY et al., 2019). Dans ces travaux, les exploitations de grandes cultures, pourtant majoritaires en France métropolitaine (LEVERT et al., 2025), sont encore peu représentées. Les pratiques agricoles et les choix des cultures implantées y sont fortement influencés par les exigences des différents processus de transformation de la matière première au produit fini, ainsi que par les critères technologiques et les références techniques permettant d'atteindre ces critères, fixés par des coopératives et des industriels des filières de masse (GEELS, 2002; LABARTHE et al., 2021; PLATEAU et al., 2021; VALIORGUE, 2020).

Dans le cadre de ce travail, nous avons caractérisé, pour une diversité d'exploitations de grandes cultures en France métropolitaine, les places qu'occupent les pratiques agroécologiques au sein de leurs orientations stratégiques et de leurs finalités.

1. Matériel et Méthode

Quinze entretiens libres ont été menés auprès d'agriculteurs localisés dans le nord de la France métropolitaine, dans les régions de Bourgogne, d'Île-de-France, de Normandie et du Grand Est. Cette zone géographique a été choisie car elle concentre la majorité des exploitations de grandes cultures (Insee, 2024). L'échantillonnage a été conçu pour couvrir la diversité des stratégies d'intégration de l'agroécologie dans les stratégies d'exploitation. Pour ce faire, nous avons choisi d'intégrer des exploitations qui mettaient ou non en œuvre des pratiques agroécologiques. Les exploitations ont été sélectionnées afin de couvrir une diversité de systèmes de production : Agriculture Biologique (27 %), agriculture de conservation des sols (20 %), agriculture conventionnelle (40 %) et autres systèmes (13 %) (Tableau 1). Les exploitations ont été identifiées avec l'aide de structures de conseil (telles que les chambres d'agriculture), par le bouche-à-oreille, en raison de leur intégration à des dispositifs de recherche et de leurs communications sur différents médias, dont la presse agricole.

Chaque entretien a été mené en face à face, pour une durée d'environ 2 h 30 suivant un guide d'entretien structurée en trois parties :

(i) Une contextualisation de l'exploitation agricole intégrant son historique, son contexte pédoclimatique, sa situation économique et territoriale, son fonctionnement actuel, ainsi que ses ressources propres (nombre de personnes travaillant sur l'exploitation, matériel,…) ;

(ii) (ii) Un focus sur les itinéraires techniques des différentes cultures, visant à comprendre les choix, attendus et motivations associées aux pratiques mises en œuvre ;

(iii) (iii) Une partie portant sur les enjeux et les défis de l'exploitation et de l'agriculteur (finalités de l'exploitation, projets en cours ou à venir, éléments économiques, …).

Les entretiens ont été enregistrés, retranscrits et codés à l'aide du logiciel NVivo (Lumivero, 2025) selon une approche itérative et abductive. La grille de codage a été élaborée afin d'identifier, dans les récits des agriculteurs, les éléments relatifs aux finalités de l'exploitation, les éléments se référant aux orientations stratégiques, les éléments techniques relatifs aux cultures et, parmi ceux-ci, ceux relevant des pratiques agroécologiques telles que définies par WEZEL et al. (2014 et 2020). Ces éléments ont ensuite été mobilisés pour élaborer des catégories d'insertion des pratiques agroécologiques dans les orientations stratégiques et les finalités des exploitations.

Tableau 1 : Caractéristiques des exploitations étudiées

Code	Type de pratiques	SAU[5]	UTH[6]	Tranche d'Age	Autres ateliers sur l'exploitation	Autres activités de l'agriculteur	Région
A1	ACS[1]	122	1	40-49	Moulin		Bourgogne
A2	Conventionnel[2]	300	2	40-49			Bourgogne
A3	Agriculture Biologique	300	3	50-59			Ile-de-France
A5	Agriculture Biologique	280	1,5	50-59		Conseiller chambre d'agriculture et maire	Ile-de-France
A6	Agriculture Biologique	218	3,3	50-59	Moulin	Conférencier	Ile-de-France
A7	"Agriculture intégrée"[3]	89	1	60-69			Normandie
A8	Conventionnel[2]	170	1.5	50-59	Vente de protéagineux	Président d'association	Normandie
A9	Conventionnel[2]	89	1	50-59			Normandie
A10	Agriculture Biologique et agroforesterie	135	1	60-69			Normandie
A11	ACS[1]	150	1,5	70-79			Grand-Est
A12	Déconversion[4]	400	1	40-49	Ovin (minoritaire)	Maire	Grand-Est
A13	"Agriculture raisonnée"[3]	530	4,5	50-59			Grand-Est
A14	Conventionnel[2]	335	2	60-69		Prestation de service pour une autre exploitation	Grand-Est
A15	Conventionnel[2]	320	2	40-49	Méthaniseur		Ile-de-France
A16	ACS[1]	288	2.5	50-59	Huilerie	Prestation de pressage	Ile-de-France

1 : ACS : Agriculture de Conservation des sols. Il s'agit de systèmes de culture dans lesquels aucun travail du sol n'est réalisé.
2 : Systèmes de culture conventionnels : système de culture qui correspondent aux pratiques majoritairement mises en place au sein d'une région. Dans notre cas, ces pratiques impliquent le recours aux intrants de synthèse et un travail du sol avec ou sans labour.
3 : Systèmes qui correspondent selon les déclarations de l'agriculteur à des systèmes de culture intégrés (Agriculture intégrée), *i.e.* où le recours aux produits phytosanitaires de synthèse intervient en dernière intention et s'appuie sur la mobilisation d'indicateurs et d'outils d'aide à la décision ou à des systèmes raisonnés (Agriculture raisonnée), *i.e.* où l'usage de produits phytosanitaires de synthèse s'appuie sur la mobilisation d'indicateurs et d'outils d'aide à la décision afin de réduire la fréquence et les doses utilisées.
4 : Déconversion : sortie de la labélisation de l'exploitation en Agriculture Biologique et retour vers un système de culture conventionnel.
5 : Surface Agricole Utile (ha)
6 : Unité de Travail Humain, nombre de personne travaillant sur l'exploitation

2. Résultats

2.1. Les principales catégories de finalités poursuivies par les agriculteurs

Nous avons identifié cinq catégories de finalités au sein des exploitations enquêtées. Deux à quatre finalités sont poursuivies conjointement selon les exploitations. Compte tenu de la nature entrepreneuriale des exploitations enquêtées, la viabilité économique de la structure constitue la première finalité mise en avant et partagée par l'ensemble des agriculteurs. Cette viabilité est identifiée comme une condition de pérennité et de robustesse de l'exploitation agricole dans sa capacité à faire face à des aléas, et s'appuie sur des orientations stratégiques

différentes selon les agriculteurs : piloter le coût de production en amont et au cours du cycle de culture (A1, A3, A7, A8, A16), « *un de mes objectifs, c'est aussi d'avoir des charges de mécanisation les plus faibles possible* » (A16) ; l'autonomie de l'exploitation vis-à-vis des achats d'intrants (A5, A6, A8, A9, A16) « *mon idée, c'est de trouver de l'azote quelque part comme tout le monde et donc comme je cultive des pois, moi je vais ressemer un peu plus de pois en interculture. […] dans les parcelles où je mets les pois, je sais que c'est pas terrible de faire ça* [note : mettre des pois en interculture et en culture principale] *donc pour essayer de trouver un peu d'azote, je mettrai du trèfle ou des choses comme ça.* » (A9) ; la fixation d'objectifs de production minimum (A2, A3, A11, A12), « *moi j'estime qu'avant, quand j'étais en conventionnel, on avait une ferme qui était très productive, la ferme doit rester très productive* » (A3) ; la maîtrise des prix de vente (A1, A7, A11, A14, A15, A16), « *Et puis du coup, ça me sort le prix minimum auquel je dois vendre pour arriver à tout boucler et puis à me sortir un peu un salaire par culture même* » (A7) ; diversifier les ateliers de production (A16) ou les cultures (A10), « […], *là c'est facile de faire des marges avec une huilerie, […], alors normalement,* [note : l'huilerie sert à] *faire de la marge en plus. Sauf que cette année, c'est elle qui fait la trésorerie pour les deux sociétés*. » (A16).

La seconde finalité, relative à la transmissibilité de l'exploitation, est évoquée par les agriculteurs principalement en fin de carrière (A5, A8, A10). Cette transmissibilité repose sur la continuité de l'activité et le maintien d'un outil de production considéré comme viable pour les générations suivantes, que ce soit sur le plan économique ou sur le plan de la capacité de l'agroécosystème à produire. La recherche de transmissibilité de l'exploitation s'appuie sur des orientations stratégiques de construction d'un système de culture qui réponde à une diversité d'objectifs, dont le temps de travail, « *Bon, c'est quand même intéressant pour la rotation […], j'y suis revenu aussi* [note : arrêt de la culture de chanvre]*, c'est plus dans une perspective de la transmission à mon fils, qui va se retrouver avec plus de surface et puis moi avec moins en moins, enfin petit à petit. C'est moins de travail*. » (A10).

La troisième catégorie de finalité traduit le besoin exprimé par certains agriculteurs de « redevenir » agriculteurs, en redonnant du sens à leur métier. Cette réappropriation est rendue possible par les questionnements et les échanges qui précèdent et accompagnent l'intégration de pratiques agroécologiques dans les systèmes de culture, voire la reconception de leur système de production. Cette finalité est associée à des choix agronomiques répondant aux valeurs évoquées par les agriculteurs, ainsi qu'à des finalités de transmission. L'acquisition de connaissances au sein de réseaux de pairs (A5, A6, A7, A15) ou individuellement (A3, A16) est centrale dans les stratégies organisationnelles qui supportent cette finalité. « *Depuis deux ans j'ai énormément progressé* [note : depuis qu'il a augmenté son volume horaire en tant que conseiller]*, je progresse encore plus vite sur mon exploitation parce que je vois plein de trucs, j'ai plein d'idées, des choses que j'ai jamais osé faire ou que je ne faisais pas, que j'avais jamais pensé et finalement c'est pas mal.* » (A5)

La quatrième finalité traduit une recherche d'autonomie organisationnelle en termes de gestion du parc matériel. Cette autonomie s'appuie sur un investissement important dans le matériel agricole (A2) « *On est pas mal à vouloir se débrouiller tout seul, malgré qu'on ne soit pas en mauvais termes avec les voisins. […]. La moissonneuse-batteuse, on l'a tout seul, tout ce qui est matériel important, on l'a tout seul. Mais donc voilà, malgré que la conjoncture fait qu'on achète le matériel cher, et c'est de moins en moins intéressant…* » ; ou sur la sélection du matériel jugé nécessaire à l'autonomie organisationnelle, le reste du matériel étant en commun, sous forme de Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole

(CUMA) ou de partenariats entre agriculteurs (A1, A3), « *…j'ai dit l'exploitation, il faut que j'évolue, ça veut dire qu'il faut que je rachète du matériel, tout ça, donc je suis parti avec une CUMA. Donc en fait tout le matériel de labour, il est neuf mais il est pas mal, je me suis juste racheté un tracteur parce que c'est quand même mon outil de travail et puis prendre du matériel tout le temps des autres ou non, ça va pas. Donc je m'étais juste racheté un tracteur l'année dernière et comme ça au moins je fonctionne avec une CUMA*. » (A1).

Enfin, la cinquième finalité consiste à améliorer, voire à préserver l'agroécosystème dans lequel s'inscrit l'exploitation. La préservation de l'agroécosystème, en tant que finalité, s'appuie sur la stratégie de préservation des paysages (A3, A10), « *Moi c'est ce qui me correspondait le plus. Je voulais essayer de retrouver ce lien entre l'homme et la terre. Je trouvais qu'on avait perdu en agriculture dite conventionnelle.* » (A3) ; l'amélioration du bilan carbone de l'exploitation, par exemple par la mise en place de techniques qui stockent le carbone et enrichissent la terre en matière organique « *pour le carbone, tout ça, on a choisi de broyer nos pailles.* [note : Le broyage et la restitution de la paille au sol permettent d'enrichir la terre en matière organique et de stocker du carbone] » (A10), ou la préservation des sols (A3 et A6 par exemple). « *Pour préserver les sols, la luzerne c'est bien, mais il faudrait mettre une prairie temporaire de trois, quatre ans. Et là, on a fait des essais en mélangeant trèfle, un peu de luzerne et des graminées. Là vous retrouvez la terre, sur les terres argileuses vous retrouvez une terre noire et tout, puis vous cartonnez, vous faites des 62 quintaux.* » (A6).

2.2 Contribution des pratiques agroécologiques aux orientations stratégiques des exploitations

Les pratiques agroécologiques mises en œuvre s'inscrivent à deux échelles spatiales distinctes : celle de la culture et de sa conduite, et celle de la parcelle (i.e. le support physique et les processus biogéochimiques associés) et des éléments non cultivés qui l'entourent (bordure de parcelle, haie…).

À l'échelle de la culture, les pratiques agroécologiques portent principalement sur la nutrition azotée des plantes – par insertion d'espèces de légumineuses dans la rotation ou la mise en place de couverts en période d'interculture (A1, A3, A5, A7, A16), la gestion de la santé des cultures par l'alternance de cultures d'hiver et de printemps, et le choix de variétés résistantes à certaines maladies (A1, A3, A8, A9, A13).

À l'échelle de la parcelle et de l'agroécosystème qui l'entoure, l'agroécologie porte sur l'adoption de pratiques favorisant le fonctionnement des sols -e.g. vitesse et profondeur de passage des outils, l'implantation de couverts, la réduction du travail du sol - (A1, A3, A5, A6, A7, A15), ainsi que sur la réintégration de la biodiversité par l'introduction de haies, de bandes enherbées ou encore l'agroforesterie (A3, A7, A10).

Si les pratiques agroécologiques ne contribuent pas à l'autonomie organisationnelle en matière de gestion du parc matériel, elles contribuent directement aux autres finalités identifiées plus haut (Tableau 2).

La contribution des pratiques agroécologiques aux orientations stratégiques économiques s'appuie sur : i) la diversification des cultures au sein des successions et ii) la réduction des intrants chimiques ou achetés car produits en dehors de l'exploitation.

i) Les successions de cultures diversifiées, comprenant généralement de 6 à 10 espèces cultivées, contribuent à limiter les risques associés à des pertes de rendement, notamment par la réduction de la pression des bioagresseurs, du fait de l'allongement du délai de retour des cultures, mais également par une répartition des risques liés aux aléas climatiques, en répartissant la production sur plusieurs espèces semées et récoltées à des périodes de l'année différentes. La diversité des cultures mises en place est alors valorisée, en externe, par la diversification des contrats et des débouchés commerciaux (épeautre, lentilles, haricots verts, chanvre…) (A5, A7, A10, A14, A15) « *La diversité des cultures permet de beaucoup plus lisser le résultat de l'entreprise. Quand je regarde les années [au sein] du groupe de mon centre de gestion, qui est le même depuis le début, les fluctuations de rentabilité sont beaucoup moins importantes qu'en conventionnel.* » (A5). Cette diversification des cultures est également facilitée par leur valorisation directement sur l'exploitation, par exemple à travers un moulin ou une presse en huilerie (A1, A6, A16).

ii) Pour nombre d'entre elles, les pratiques agroécologiques visent à réduire la dépendance aux intrants de synthèse ou organiques produits en dehors de l'exploitation. Les pratiques mises en œuvre visent notamment à favoriser la circularité de l'azote entre cultures, en intégrant des espèces légumineuses, des couverts « engrais vert » ou en valorisant une culture à des fins d'engrais (par ex. la culture de luzerne valorisée comme ressource azotée sous forme de compost) – (A3, A5, A7, A8, A10, A12, A15). « *On a un super couvert, un mélange de 7 ou 8 espèces qu'on n'a pas récolté parce qu'on n'a pas forcément besoin* [note : pour le méthaniseur], *mais ça bénéficie au sol derrière*. » (A15), « *Il y en a trop là* [note : des altises, qui sont des ravageurs du colza]*, par contre tu regardes là-bas, il n'y en a pas. Et puis là-bas, il y a 5 coccinelles. Voilà, on a quand même des seuils. Quand le seuil vraiment, où on arrive, qu'on voit que c'est tout noir, on se dit bon, la culture est vraiment engagée. Il faut appliquer vraiment quelque chose*. » (A1)

Certaines pratiques agroécologiques mises en œuvre, s'attachent à réduire la pression en insectes ravageurs, à réduire les risques de pertes de rendement ou à réduire les doses ou le nombre de passages de produit phytosanitaire (A1, A3, A8, A10, A11, A14, A15) : « *Je ne fais pas par exemple qu'une variété de colza, j'en mets au moins 3-4. Comme ça au moins il y a de tout. Il y a un qui va être plus précoce, comme ça au moins, ne serait-ce que rien que pour les insectes, ils vont aller sur celui-là, comme ça l'autre il va pouvoir pousser gentiment. C'est pour ça qu'il y a un moment où il ne faut pas être buté à dire « les insectes là ils sont tous... je vais faire un insecticide ». Il faut essayer de faire différentes associations de cultures, comme ça au moins les insectes vont aller plus sur l'autre, pendant que l'autre va pouvoir pousser tranquillement* » (A1).

Cette contribution des pratiques agroécologiques aux stratégies économiques est généralement appuyée par la souscription de contrats garantissant les prix d'achat des productions et par des capacités de stockage permettant de valoriser des espèces non collectées par les organismes stockeurs habituels.

Du point de vue de la « réappropriation » du métier d'agriculteur, les pratiques agroécologiques occupent une place centrale. Les systèmes de culture mis en œuvre par les agriculteurs mobilisent des pratiques agroécologiques structurantes, c'est-à-dire qui impliquent des investissements (matériels ou fonciers), une évolution de l'organisation du travail et une insertion dans de nouvelles filières. Il s'agit de systèmes de culture sans travail du sol (A16), de systèmes en agriculture biologique intégrant des leviers agroécologiques à

l'échelle du paysage (haie, bande enherbée) (A3, A10) et de systèmes en agriculture biologique ou conventionnelle ayant une réflexion approfondie sur l'autonomie et le bouclage des cycles de nutriments à l'échelle des parcelles (A5, A6 et A7). Pour ces exploitations, la maîtrise des pratiques agroécologiques constitue un élément central de la performance et de la reconnaissance de l'agriculteur envers ses pairs, la société ou encore la recherche. Ces agriculteurs réalisent des essais sur leurs exploitations et consacrent du temps à la recherche d'innovations, individuellement ou au sein de réseaux de pairs « *On a fait un essai, semer un engrais vert sans fissuration et semer un engrais vert avec fissuration. L'engrais vert faisait 70 cm de plus haut, là où on avait fissuré, que là où on n'avait pas fissuré*. » (A3).

Les agriculteurs ayant réfléchi ou réfléchissant à la transmission de l'exploitation aux générations suivantes (généralement leurs enfants) mobilisent des pratiques agroécologiques afin de transmettre une exploitation qu'ils perçoivent comme durable sur le plan économique, mais dont le potentiel de production de l'agroécosystème est également préservé. Pour ces agriculteurs, cette finalité est généralement concomitante de la réappropriation du métier d'agriculteur (A3, A5, A10). La transmission constitue alors un élément déclencheur de l'évolution des pratiques, notamment la conversion à l'agriculture biologique ou la diversification des successions de cultures, lorsque les projets des enfants conduisent à envisager de nouvelles pratiques agroécologiques (A10, A8) : « *Les légumineuses qu'on fait aujourd'hui,* [c'est] *puisque ma fille est revenue sur la ferme pour s'installer avec un développement de marque de légumineuses sèches* ».(A8) ; « *J'ai sûrement attendu que mon fils soit assez âgé pour être capable de voir si ça l'intéressait ou pas* [de passer en agriculture biologique], *enfin de le dire. Parce que... Il n'était pas... Bon, ce n'était pas un garçon sans arrêt sur le tracteur, mais il s'intéressait comme ça, mais c'était pas encore vraiment déterminé. Mais là, bon, arrivé à... 2018... Il a 20 ans, quoi. Son seul intérêt c'est vraiment qu'on bascule en bio.* » (A10).

Tableau 2 : Finalités et orientations stratégiques et pratiques agroécologiques associées.

Finalités	Orientations stratégiques	Pratiques agroécologiques associées	Agriculteurs mettant en place les pratiques agroécologiques
Viabilité économique	Diversifier les ateliers et les cultures	Succession culturale diversifiées, espèces non valorisées par les coopératives permettant la diversification des successions (épeautre, lentilles, …)	A5, A7, A10, A14, A15
	Maitriser le prix de vente par le stockage et la valorisation directe sur l'exploitation		A1, A6, A16
	Autonomie vis-à-vis des achats d'intrants	Implantation de cultures restituant de l'azote, fertilisation organique, mélange et choix de variétés résistantes aux maladies, mise en place de couvert végétal	A3, A5, A7, A8, A10, A12, A15
	Piloter le coût de production en amont et au cours du cycle de culture	Réduction de l'usage d'intrants de synthèse (azote et fongicides)	A7, A9, A11, A12, A14, A15
	Fixer des objectifs de production		
Réappropriation du métier, création et partage des savoirs	S'auto-former, former d'autres exploitants, communiquer auprès du grand publique	Expérimentations (ex. compost de luzerne), mise en place de sentier d'interprétation agricole, participation à des travaux de recherches	A3, A5, A6, A7, A10
	Repenser le système vers une réduction du travail du sol et de l'usage d'intrants	Systèmes de culture sans travail du sol ; culture de luzerne pour la production de compost azoté ; intercultures courtes et longues et couverts associés	A3, A5, A6, A7, A10, A16
Transmission de l'exploitation	Repenser le système de culture en prenant en considération les générations futures	Succession de cultures diversifiée pour accompagner l'organisation du travail ; Intégration de légumineuses dans la rotation	A3, A5, A8, A10
Préservation de l'agroécosystème	Maintien de la fonctionnalité des sols pour améliorer la condition de croissance des plantes	Intercultures, réduction du travail du sol, mise en place de couverts	A1, A5, A6, A13
	Préservation des paysages, amélioration du bilan carbone de l'exploitation, préservation des sols	Agroforesterie, redécoupage du parcellaire et insertion de bandes enherbées et mellifères	A3, A7, A10
Autonomie matérielle ou organisationnelle	Investir dans du matériel et des bâtiments de stockage, intégrer une CUMA	nc	

3. Discussion

À partir de quinze entretiens libres, nous avons caractérisé les places de l'agroécologie dans les finalités et les orientations stratégiques d'exploitations de grandes cultures en France métropolitaine. Nous avons mis en évidence cinq types de finalités à l'échelle des exploitations, généralement poursuivies conjointement (de deux à quatre finalités selon les cas étudiés). Nous avons montré que les pratiques agroécologiques constituaient un moyen de contribuer à certaines orientations stratégiques (réduction de l'usage des intrants et pilotage du coût de production), un élément structurant de stratégies visant la réappropriation du métier d'agriculteur ou une finalité en soi (préserver les agroécosystèmes).

Si les pratiques agroécologiques mobilisées dans ces différents cas de figure sont nombreuses, à l'échelle de la parcelle, elles portent principalement sur la gestion de l'azote, la diversification des cultures et l'usage de variétés résistantes aux maladies. Les pratiques agroécologiques s'adressent alors principalement à la réduction des intrants chimiques ou visent à améliorer leur efficience (mobilisation de variétés résistantes aux maladies, insertion de légumineuses pour réduire les apports d'engrais azotés minéraux) (YGAUNIN et al., 2026). L'agroécologie apparaît comme un substitut technique à un intrant et relève alors principalement d'une modification de l'itinéraire technique, un changement de moyen plutôt que stratégique, généralement sans remettre en question les finalités du système de production. À l'inverse, lorsque l'agroécologie est convoquée comme élément structurant d'une orientation stratégique ou comme finalité, elle participe à une transformation plus globale du système de production. Cette distinction s'inscrit dans la classification des pratiques agroécologiques proposée par WEZEL et al. (2014).

À l'échelle de l'agroécosystème, les pratiques agroécologiques mises en œuvre s'appuient sur l'insertion d'éléments non cultivés afin de favoriser la biodiversité, que celle-ci soit patrimoniale ou auxiliaire, c'est-à-dire associée à des processus de régulation des bioagresseurs. Si les travaux portant sur l'intérêt de ce type de structure ont montré leur intérêt agronomique ou écologique à l'échelle de la parcelle (BANNWART et al., 2026), à notre connaissance, aucun travail n'avait montré que ces aménagements contribuaient à des finalités d'exploitation.

L'adoption de pratiques agroécologiques repose sur des choix adaptés aux contextes et aux finalités de l'exploitation (DURU et al., 2015; WEZEL et al., 2014). La majorité des travaux s'intéressant à l'agroécologisation des exploitations agricoles analyse alors l'intérêt économique ou agronomique d'une pratique ou d'un système de culture qualifié d'agroécologique (Alletto et al., 2022 ; Rodigues et al., 2021) en évaluant ses performances, généralement à l'échelle de la parcelle. Dans notre étude de cas, les exploitations où l'agroécologie occupe la place la plus centrale — à la fois dans les finalités poursuivies et dans les orientations stratégiques mises en œuvre — s'inscrivent généralement dans des trajectoires de transformation de l'exploitation qui rejoignent un projet de vie porté par les agriculteurs (SLIMI et al., 2021). La mesure de la performance des pratiques agroécologiques mises en œuvre ne peut alors pas se limiter à la parcelle et nécessite de repenser la notion même de performance associée à ces pratiques. En effet, l'agroécologisation ne relève pas uniquement d'une évolution des pratiques techniques, mais s'inscrit dans une transformation

plus large de l'exploitation et du métier d'agriculteur, ainsi que dans la pérennisation de l'exploitation agricole par sa transmission.

Cette intégration profonde de l'agroécologie s'accompagne d'une insertion de l'agriculteur au sein de collectifs où cette orientation agroécologique est valorisée et reconnue par les pairs (par ex. groupes Dephy, Groupement Agriculteurs Biologiques). Nos résultats confirment le rôle des réseaux d'agriculteurs et des dispositifs d'accompagnement dans les processus d'adoption et de diffusion des pratiques agroécologiques, en ce qu'ils contribuent non seulement à leur adoption, mais également à la performance perçue des exploitations (LABARTHE, 2016 ; LE MERLUS, 2026). Cette perspective invite à repenser l'accompagnement des agriculteurs et le rôle des conseillers dans la prise de décision, à concevoir des politiques publiques davantage attentives à la diversité des exploitations agricoles et des pratiques, qu'elles soient ou non mises en place, et à poursuivre les recherches sur les facteurs favorisant l'adoption et le maintien de pratiques agroécologiques chez les exploitants.

Notre travail a mobilisé quinze exploitations en grandes cultures, identifiées par le bouche-à-oreille, via des structures de conseil et différents médias, dont la presse agricole. Le processus d'échantillonnage, s'il réduit la représentativité de l'échantillon, en donnant accès à des agriculteurs bénéficiant déjà d'une certaine visibilité, nous a néanmoins permis de capter une grande diversité de systèmes de culture, d'orientations stratégiques et de finalités. Nos résultats exploratoires mettent en évidence des tendances et des hypothèses susceptibles d'être approfondies dans le cadre de travaux complémentaires. Il serait notamment nécessaire d'intégrer des profils d'exploitation encore peu représentés dans notre échantillon, tels que les exploitations en agriculture biologique de conservation des sols, des agriculteurs âgés de moins de 40 ans, ainsi que des exploitations localisées dans le Sud-Ouest de la France, afin de confronter les catégories identifiées ici à un contexte pédoclimatique plus contraignant quant aux types de culture pouvant être mis en œuvre, mais sans doute plus favorable à la diversification des ateliers en plus des grandes cultures (maraîchage notamment) ainsi qu'à la vente directe (BERMOND et al., 2019).

Notre étude avait non pas pour ambition d'assurer une représentativité statistique des exploitations de grandes cultures, mais plutôt de présenter la diversité des systèmes de production et la manière dont ils intègrent les pratiques agroécologiques. Les premiers résultats obtenus peuvent néanmoins constituer une base pour formuler des hypothèses qui pourraient être testées sur un échantillon plus vaste à l'aide de questionnaires fermés, ou en mobilisant des bases de données constituées à l'échelle d'exploitations, telles que celles de la statistique agricole (Enquêtes pratiques, Agreste ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire, 2025) ou de dispositifs d'accompagnement d'agriculteurs (AgroSyst pour les groupes DEPHY, BADIE et al., 2024).

Conclusion

Notre étude montre que l'agroécologisation des exploitations agricoles ne se résume pas à la nature ou au nombre de pratiques mises en œuvre, mais renvoie au sens qu'elle prend pour l'exploitation agricole et l'agriculteur. Une même pratique agroécologique peut alors relever d'une recherche d'efficacité technique, d'une substitution ponctuelle d'une pratique ou d'un intrant, ou être un élément central d'une orientation stratégique et participer à une transformation plus profonde des finalités et du fonctionnement de l'exploitation.

Références bibliographiques

ALLETTO L., VANDEWALLE A. & DEBAEKE P. (2022). Crop diversification improves cropping system sustainability: An 8-year on-farm experiment in South-Western France. Agricultural Systems, 200, 103433. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103433

BADIE T., REBOUD X., ROUSSELET S., PEYRARD T. & VUITTENEZ B. (2024). Datagrosyst : Plateforme d'accès aux données issues d'Agrosyst [Jeu de données]. Recherche Data Gouv. https://doi.org/10.57745/CCG8OO

BANNWART P., GARDARIN A., DEYTIEUX V., CORDEAU S. & PETIT S. (2026). Pesticide-free fields under minimum tillage and flower strips enhance carabid beetles and spiders through increased overwintering and spill over processes. Agriculture, Ecosystems & Environment, 400, 110250. https://doi.org/10.1016/j.agee.2026.110250

BERMOND M., GUILLEMIN P. & MARECHAL G. (2019). Quelle géographie des transitions agricoles en France ? Une approche exploratoire à partir de l'agriculture biologique et des circuits courts dans le recensement agricole 2010. Cahiers Agricultures, 28, 16. https://doi.org/10.1051/cagri/2019013

CAPITAINE M., GARNIER A., JEANNEAUX P., PERVANCHON F., CHABIN Y., BLETTERIE N., DE TORCY B. & DE FRAMOND H. (2013). Accompagner la démarche de management stratégique de l'exploitation agricole. Économie rurale, 337(5), 75–90. https://doi.org/10.4000/economierurale.4118

COQUIL X., CERF M., AURICOSTE C., JOANNON A., BARCELLINI F., CAYRE P., CHIZALLET M., DEDIEU B., HOSTIOU N., HELLEC F., LUSSON J-M., OLRY P., OMON B. & PROST L. (2018). Questioning the work of farmers, advisors, teachers and researchers in agro-ecological transition: A review. Agronomy for Sustainable Development, 38(5), 5. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0524-4

DURU M., THEROND O. & FARES M. (2015). Designing agroecological transitions: A review. Agronomy for Sustainable Development, 35(4), 1237–1257. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x

DUVAL J. E., BLANCHONNET A. & HOSTIOU N. (2021). How agroecological farming practices reshape cattle farmers' working conditions. Agroecology and Sustainable Food Systems, 45(10), 1480–1499. https://doi.org/10.1080/21683565.2021.1957062

FANCHONE A., ALEXANDRE G., CHIA E., DIMAN J-L., OZIER-LAFONTAINE H. & ANGEON V. (2020). A typology to understand the diversity of strategies of implementation of agroecological practices in the French West Indies. European Journal of Agronomy, 117, 126058. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126058

FEISTHAMMEL D. & MASSOT P. (2005). Fondamentaux du pilotage de la performance : Le tableau de bord adapté à la réalité des activités. AFNOR.

GAFSI M. (2017). Les stratégies de diversification des exploitations agricoles : Enseignements théoriques et empiriques. Économie rurale, 360, 43–63. https://doi.org/10.4000/economierurale.5257

GEELS F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case study. Research Policy, 31(8–9), 1257–1274. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8

GIAGNOCAVO C., DE CARA-GARCÍA M., GONZÁLEZ M., JUAN M., MARÍN-GUIRAO J. I., MEHRABI S., RODRÍGUEZ E., VAN DER BLOM J., & CRISOL-MARTÍNEZ E. (2022). Reconnecting farmers with nature through agroecological transitions: Interacting niches and experimentation and the role of agricultural knowledge and innovation systems. Agriculture, 12(2), 137. https://doi.org/10.3390/agriculture12020137

GUICHARD M. & MICHAUD R. (1994). La stratégie à pas comptés : Piloter l'entreprise agricole dans l'incertitude et dans la complexité. CNERTA-SED.

GLIESSMAN S. (2018). Defining agroecology. Agroecology and Sustainable Food Systems, 42(6), 599–600. https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1432329

HAZARD L., COUIX N. & LACOMBE C. (2022). From evidence to value-based transition: The agroecological redesign of farming systems. Agriculture and Human Values, 39(1), 405–416. https://doi.org/10.1007/s10460-021-10258-2

HEMIDY L., MAXIME F. & SOLER L.-G. (1993). Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole. Cahiers d'Économie et de Sociologie Rurales, 28(1), 91–118. https://doi.org/10.3406/reae.1993.1364

Insee. (2024). Principales cultures en France. Dans Transformations de l'agriculture et des consommations alimentaires (Insee Références, éd. 2024)

LABARTHE P. (2016). Transformations du conseil aux agriculteurs et innovations agronomiques, perspectives et débats européens. Agronomie, Environnement & Sociétés, 6(2), 177–184.

LABARTHE P., COLENO F., ENJALBERT J., FUGERAY-SCARBEL A., HANNACHI M., & LEMARIÉ S. (2021). Exploration, exploitation and environmental innovation in agriculture: The case of variety mixture in France and Denmark. Technological Forecasting and Social Change, 172, 121028. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121028

LE MERLUS E. (2026). Comprendre la diversité des trajectoires d'usage des pesticides dans les exploitations agricoles françaises : Des logiques d'action individuelles aux réseaux de dialogues des agriculteurs [Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay].

LEVERT F., LE GOUIS J. & LULLIEN-PELLERIN V. (2025). Démarches d'agroécologie dans la filière « céréales » en France. Innovations Agronomiques, 100, 86–97. https://doi.org/10.17180/ciag-2025-Vol100-art08

LITHOURGIDIS A. S., DORDAS C. A., DAMALAS C. A. & VLACHOSTERGIOS D. N. (2011). Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture. Australian Journal of Crop Science, 5(4), 396–410.

Lumivero. (2025). NVivo (Version 14) [Computer software]. https://lumivero.com/products/nvivo/

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Souveraineté alimentaire. (2025). Agreste – Pratiques culturales sur les grandes cultures et prairies [Jeu de données]. data.gouv.fr. https://www.data.gouv.fr/datasets/agreste-pratiques-culturales-sur-les-grandes-cultures-et-prairies

MINTZBERG H. (1999). Grandeur et décadence de la planification stratégique. Dunod.

PLATEAU L., ROUDART L., HUDON M., & MARÉCHAL K. (2021). Opening the organisational black box to grasp the difficulties of agroecological transition: An empirical analysis of tensions in agroecological production cooperatives. Ecological Economics, 185, 107048. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107048

RUNHAAR H. (2021). Four critical conditions for agroecological transitions in Europe. International Journal of Agricultural Sustainability, 19(3–4), 227–233. https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1906055

RUNHAAR H., FÜNFSCHILLING L., VAN DEN POL-VAN DASSELAAR A., MOORS E. H. M., TEMMINK R. & HEKKERT M. (2020). Endogenous regime change: Lessons from transition pathways in Dutch dairy farming. Environmental Innovation and Societal Transitions, 36, 137–150. https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.06.001

RYSCHAWY J., MORAINE M., PÉQUIGNOT M. & MARTIN G. (2019). Trade-offs among individual and collective performances related to crop–livestock integration among farms: A case study in southwestern France. Organic Agriculture, 9(4), 399–416. https://doi.org/10.1007/s13165-018-0237-7

SLIMI C., PROST M., CERF M. & PROST L. (2021). Exchanges among farmers' collectives in support of sustainable agriculture: From review to reconceptualization. Journal of Rural Studies, 83, 268–278. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.01.019

TERÁN-SAMANIEGO K., ROBLES-PARRA J. M., VARGAS-ARISPURO I., MARTÍNEZ-TÉLLEZ M. Á., GARZA-LAGLER M. C., FÉLIX-GURRLOLA D., MAYCOTTE-DE LA PEÑA M. L., TAFOLLA-ARELLANO J. C., GARCÍA-FIGUEROA J. A. & ESPINOZA-LÓPEZ P. C. (2025). Agroecology and sustainable agriculture: Conceptual challenges and opportunities—A systematic literature review. Sustainability, 17(5), 1805. https://doi.org/10.3390/su17051805

TICHIT M. & DUMONT B. (2016). L'agroécologie : Origines, bases scientifiques et déclinaisons en élevage. In L'agroécologie : Du nouveau pour le pastoralisme (p. 106). Cadère éditeur. https://hal.science/hal-01532583

TITTONELL P. (2020). Assessing resilience and adaptability in agroecological transitions. Agricultural Systems, 184, 102862. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102862

TOFFOLINI Q., JEUFFROY M.-H. & PROST L. (2016). Indicators used by farmers to design agricultural systems: A survey. Agronomy for Sustainable Development, 36(1), 5. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0340-z

VALIORGUE B. (2020). Pas de troisième révolution agricole sans une profonde réforme comptable. Agridées, 243, 24-26

VERKUIL L. A., VERBURG P. H., LEVERS C., STRATTON A. E. & SCHULP C. J. E. (2024). Bright spots of agroecology in the Netherlands: A spatial analysis of

agroecological practices and income stability. Agricultural Systems, 220, 104086. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104086

VIGUIER L., CAVAN N., BOCKSTALLER C., CADOUX S., CORRE-HELLOU G., DUBOIS S., DUVAL R., KEICHINGER O., TOQUE C., TOUPET DE CORDOUE A.-L. & ANGEVIN F. (2021). Combining diversification practices to enhance the sustainability of conventional cropping systems. European Journal of Agronomy, 127, 126279. https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126279

WEZEL A., BELLON S., DORÉ T., FRANCIS C., VALLOD D., & DAVID C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice: A review. Agronomy for Sustainable Development, 29(4), 503–515. https://doi.org/10.1051/agro/2009004

WEZEL A., CASAGRANDE M., CELETTE F., VIAN J.-F., FERRER A., & PEIGNÉ J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture: A review. Agronomy for Sustainable Development, 34(1), 1–20. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7

WEZEL A., KRUSE M., LANGER V., OEHL F., POTTHOFF M. & SCRIMGEOUR F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review. Agronomy for Sustainable Development, 40, 40. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z

YGAUNIN, E., COLÉNO, F., QUINIO, M., & BARBOTTIN, A. (2026). How are agroecological practices integrated into farmers' strategies ?. 19th Congress of the European Society for Agronomy, Tartu, Estonia.

Revue Industries Durables : Enjeux d'Éthique et de Soutenabilité (IDEES)
ISSN : en cours d'acquisition – N°1 Novembre 2026

Les enjeux et modalités de la mise en place des biodéchets dans le Grand Reims



Enola Lamy
Docteure en Sciences de gestion
Université Reims Champagne-Ardennes
Laboratoire CRIEG

Introduction

La généralisation du tri à la source des biodéchets au 1er janvier 2024 constitue un tournant structurant pour les collectivités territoriales. Cette évolution soulève alors une interrogation centrale : comment les collectivités peuvent-elles concilier les exigences de performance environnementale imposées par la réglementation avec les conditions d'acceptabilité sociale nécessaires à la réussite du tri à la source des biodéchets ? L'étude du Grand Reims vise à éclairer cette question en mobilisant les apports de la performance globale, de la théorie des parties prenantes et des approches du New Public Management.

Cette contribution s'appuie sur une étude de cas (YIN, 2018) conduite dans le cadre d'une recherche doctorale portant sur la mise en œuvre du tri à la source des biodéchets dans le Grand Reims. L'approche retenue est qualitative et compréhensive (DUMEZ, 2013). Les résultats présentés reposent sur l'analyse du dispositif territorial, des observations de terrain, des échanges avec les acteurs impliqués, ainsi que sur des enquêtes réalisées auprès des usagers. L'objectif est non pas de produire des résultats généralisables mais d'identifier des enseignements susceptibles d'éclairer la gouvernance territoriale du tri à la source.

L'expérience du Grand Reims permet d'analyser cette transformation au regard des travaux effectués sur la performance globale (CAPRON et QUAIREL, 2015), la théorie des parties prenantes (FREEMAN, 1984, MITCHELL et al., 1997) et les logiques du New Public Management (HOOD, 1991, BEZES et MUSSELIN, 2015).

1. Une obligation uniforme confrontée à un territoire hétérogène

Le Grand Reims se caractérise par une forte hétérogénéité et une diversité socio-territoriale. La coexistence de zones urbaines denses, de quartiers d'habitat collectif, de secteurs pavillonnaires et de communes rurales rend illusoire toute standardisation excessive du dispositif. La collecte en porte-à-porte, pertinente en habitat individuel, se révèle plus complexe dans l'habitat vertical. Le recours aux bornes d'apport volontaire mutualisées constitue alors un compromis organisationnel, mais non neutre en termes d'acceptabilité.

Cette tension illustre un point central : la performance environnementale ne peut pas être dissociée des conditions sociales et spatiales de sa mise en œuvre. Comme le soulignent SCHEJTMAN et BERDEGUE (2004), le territoire constitue non pas un simple espace physique, mais un système d'interactions économiques et sociales. Dès lors, la gestion des biodéchets doit être pensée comme un processus territorial et non comme une simple opération logistique.

2. Une performance qui dépasse les indicateurs techniques

La littérature sur la RSE rappelle que la performance ne se limite pas à sa dimension économique (CARROLL, 1991 ; LEPINEUX et al., 2016). Transposée au niveau territorial, cette logique renvoie à la notion de responsabilité sociétale des territoires (GOUJON BELGHIT et al., 2025), qui invite à intégrer les dimensions sociales et environnementales dans le pilotage public.

Les enquêtes réalisées dans notre recherche auprès des usagers du Grand Reims montrent que l'adhésion au tri dépend moins de l'équipement mais plutôt de la compréhension du dispositif, de la clarté des consignes et de la confiance accordée à la collectivité et au prestataire.

Cette typologie confirme que l'engagement des usagers relève non pas uniquement de déterminants techniques mais dépend des ressources informationnelles, de la confiance institutionnelle et de la capacité des acteurs publics à adapter leurs modalités d'accompagnement. Elle prolonge ainsi les travaux de FREEMAN (1984) et MITCHELL et al. (1997), en montrant que la différenciation des parties prenantes constitue une condition opérationnelle de la performance territoriale.

Quatre profils d'usagers peuvent être distingués :

- des trieurs déjà engagés ;
- des publics intéressés mais insuffisamment accompagnés ;
- des publics attentifs nécessitant une pédagogie régulière ;
- un segment plus distant ou mobile.

Tableau 1 : Représentation des profils trieurs / non-trieurs

	Trieurs – 16%	**Intéressés – 51%**	**Non concernés – 24%**	**Non trieurs – 9%**
Profil	Familles avec enfants Célibataires actifs	Parent avec enfant au foyer Parents sans enfants au foyer	Retraités Jeunes parents	Etudiants Jeunes couple
Habitat	Propriétaires Quartiers résidentiels	Habitats verticaux Logements sociaux	Maisons individuelles Quartiers résidentiels	Maisons individuelles Quartiers populaires
Solution/Dispositif de collecte	Abri-bacs [27] Bornes d'apport volontaire	Abri-bacs	Abri-bacs	Bornes d'apport volontaire

Cette segmentation confirme les analyses de la théorie des parties prenantes : les acteurs ne disposent ni du même niveau de pouvoir, ni de la même légitimité, ni de la même urgence (MITCHELL et al., 1997). La réussite du dispositif suppose donc une différenciation des stratégies d'accompagnement. Ces résultats montrent que l'efficacité d'une politique publique de gestion des biodéchets repose non seulement sur la mise à disposition d'équipements, mais également sur la capacité des acteurs publics à adapter leurs modalités d'intervention aux

caractéristiques des différents publics. Ils invitent ainsi à considérer l'acceptabilité sociale comme une composante de la performance territoriale et non comme une simple conséquence de celle-ci.

3. Gouvernance partenariale et tensions du New Public Management (NPM)

Le déploiement du tri des biodéchets dans le Grand Reims s'inscrit dans un cadre contractuel structuré par des objectifs de performance, caractéristique des logiques du NPM (HOOD, 1991). La relation entre la collectivité et son prestataire repose sur des indicateurs quantifiés, principalement centrés sur les tonnages collectés et la qualité du tri.

Toutefois, les résultats de terrain montrent que la performance mesurée ne reflète pas toujours la performance vécue. Une approche exclusivement quantitative peut fragiliser l'acceptabilité sociale, en négligeant les dimensions relationnelles et pédagogiques du dispositif. Les résultats obtenus dans le Grand Reims illustrent ainsi les limites d'un pilotage exclusivement fondé sur les indicateurs de résultats. Ils suggèrent qu'une performance durable suppose également la prise en compte des dimensions relationnelles, pédagogiques et territoriales, rejoignant les travaux récents sur les modèles hybrides de gouvernance publique (DENIS et al., 2015)

Ce constat rejoint les critiques adressées au NPM, accusé de privilégier l'efficience mesurable au détriment de la légitimité démocratique (BEZES et MUSSELIN, 2015). L'enjeu devient alors d'articuler pilotage par la performance et gouvernance coopérative, dans une logique plus hybride de co-construction et management participatif.

4. Les modalités concrètes de mise en œuvre

Trois leviers apparaissent déterminants :

1. La différenciation territoriale des dispositifs, afin de tenir compte des contraintes d'habitat et des dynamiques sociales locales.
2. Une communication continue et pédagogique, reposant sur des ambassadeurs du tri et des supports adaptés aux différents publics.
3. L'élargissement des outils de pilotage, en intégrant, à côté des indicateurs techniques, des indicateurs d'acceptabilité et de qualité relationnelle.

L'adaptation d'un outil inspiré du *Balanced Scorecard* (KAPLAN et NORTON, 1996 ; FIGGE et al., 2002) permet de structurer cette approche en articulant performance financière, environnementale, sociale et de gouvernance. Cette hybridation outille la RST en la rendant opérationnelle.

4. Enjeux éthiques et soutenabilité

Au-delà des aspects organisationnels, la mise en place des biodéchets soulève des questions éthiques : équité d'accès au service, répartition des coûts, responsabilisation des citoyens sans stigmatisation.

L'acceptabilité sociale devient ici un indicateur central de soutenabilité. Elle suppose que le dispositif soit perçu comme légitime, compréhensible et équitable. La soutenabilité territoriale ne se réduit donc pas à la réduction des déchets résiduels, elle implique une cohérence entre finalités environnementales, justice sociale et viabilité économique.

Conclusion

L'expérience du Grand Reims montre que la mise en œuvre du tri à la source des biodéchets constitue un révélateur des capacités de gouvernance territoriale. Au-delà du respect d'une obligation réglementaire, elle met en évidence que la réussite du dispositif repose sur la capacité des acteurs publics à articuler performance environnementale, acceptabilité sociale et coopération entre les parties prenantes.

Cette étude de cas souligne ainsi les limites d'une approche exclusivement technique ou centrée sur les seuls indicateurs de performance. Les résultats montrent que la performance territoriale se construit également à travers des dimensions relationnelles, pédagogiques et organisationnelles, qui conditionnent l'appropriation du dispositif par les usagers. En ce sens, la Responsabilité Sociétale des Territoires offre un cadre d'analyse pertinent pour penser une performance publique plus globale, conciliant efficacité, équité et soutenabilité.

Si les enseignements présentés demeurent contextualisés au territoire du Grand Reims, ils ouvrent des perspectives de réflexion pour les collectivités confrontées aux mêmes enjeux de transition écologique, en soulignant l'intérêt d'une gouvernance davantage collaborative et d'outils de pilotage intégrant les dimensions sociales aux côtés des indicateurs techniques.

Références bibliographiques

BELGHIT, A. G., HUSSER, J., & CUENOUD, T. (2025). La Responsabilité Sociale des Territoires (RST): vers une performance sociale interactionnelle plus locale?. *Recherches en Sciences de Gestion*, *167*(2), 273-310.

CAPRON, M., & QUAIREL, F. (2015). I. Un éclairage sociohistorique et théorique de l'évolution des relations entreprise-société. *Repères*, 13-42.

CARROLL, A. (1991) The Pyramid of Corporate Social Responsibility: Toward the Moral Management of Organizational Stakeholders. Business Horizons, 34, 39-48.

DENIS, J.-L., FERLIE, E., & VAN GESTEL, N. (2015). *Understanding Hybridity in Public Organizations*. Public Administration, 93(2), 273-289.

DUMEZ, H. (2013). Qu'est-ce qu'un cas, et que peut-on attendre d'une étude de cas. *Le libellio d'AEGIS*, *9*(2), 13-26.

FIGGE, F., HAHN, T., SCHALTEGGER, S., & WAGNER, M. (2002). The sustainability balanced scorecard–linking sustainability management to business strategy. *Business strategy and the Environment*, *11*(5), 269-284.

FREEMAN, R. E. (1984). Strategic Management: A Stakeholder Approach. Boston, MA: Pitman.

HOOD, C. (1991). A public management for all seasons?. *Public administration*, *69*(1), 3-19.

KAPLAN, R. S., & NORTON, D. P. (1996). Using the balanced scorecard as a strategic management system.

LEPINEUX, F., ROSÉ, J. J., BONANNI, C., & HUDSON, S. (2016). *La RSE-La responsabilité sociale des entreprises-2e éd.: Théories et pratiques*. Dunod.

MITCHELL, R. K., AGLE, B. R., & WOOD, D. J. (1997). Toward a theory of stakeholder identification and salience: Defining the principle of who and what really counts. *Academy of management review*, *22*(4), 853-886.

MUSSELIN, C., & BEZES, P. (2015). Chapitre 5/Le new public management: entre rationalisation et marchandisation?. In *Une French touch dans l'analyse des politiques publiques?* (pp. 125-152). Presses de Sciences Po.

SCHEJTMAN, A., & Berdegué, J. A. (2004). Rural territorial development.

YIN, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods*. Sage.

***POSTER

9 PÉDAGOGIE INNOVANTE

Course en Cours

Un dispositif pédagogique innovant réalisé par plus de 100 000 élèves, né à l'IUT de Mantes en Yvelines, qui fête ses 20 ans !

Équipe pédagogique

IUT de Mantes en Yvelines - Département Génie Mécanique et Productique



Cyril BROSSARD

Professeur Agrégé en Sciences industrielles de l'ingénieur option ingénierie mécanique attaché au département Génie Mécanique et Productique

IUT de Mantes-en-Yvelines

Radouane AKRACHE

Maître de conférences

UVSQ - LISV

Thomas AUBERT

UVSQ

L'IUT de Mantes-en-Yvelines : Berceau du projet « Course en Cours »

L'IUT de Mantes-en-Yvelines, attaché à l'Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, occupe une place historique et centrale dans l'existence du dispositif Course en Cours. C'est au sein de cet établissement qu'est née, il y a 20 ans, l'ambition de rapprocher les mondes de l'enseignement supérieur et secondaire à travers un défi technologique d'envergure.

Ce projet visionnaire a été porté et impulsé par Thierry CHEVROT, qui a su transformer une idée pédagogique en une véritable institution d'abord régionale, puis rapidement nationale. Sous son impulsion, l'IUT de Mantes-en-Yvelines est devenu le point de départ d'une aventure permettant à des milliers de collégiens et lycéens de s'immerger dans l'univers de l'ingénierie.

Dès sa genèse, le programme a été co-construit avec des partenaires industriels de premier plan, Renault et Dassault Systèmes. Cette collaboration étroite entre l'IUT et les leaders du secteur avait des objectifs clairs :

- Susciter des vocations vers les filières technologique et scientifique
- Donner du sens aux apprentissages en les appliquant à un objet ludique et concret
- Favoriser la mixité et l'égalité des chances

- Développer l'esprit d'équipe et la gestion de projet
- Stimuler la créativité et l'innovation

Course en Cours est ainsi un projet éducatif interdisciplinaire proposé aux élèves de collège et de lycée. Ces élèves, répartis en équipe de 4 à 6, doivent concevoir et fabriquer un véhicule à l'aide de logiciels professionnels développés par Dassault Systèmes (Solidworks, CATIA V5 et plus récemment 3DExperience). Ce véhicule était initialement propulsé par une cartouche de CO_2 et devait effectuer des courses sur une piste droite de 20 m. Le principe de course a été conservé depuis mais le système de propulsion a rapidement évolué vers un bloc moteur électrique/batterie intelligent permettant une programmation et un pilotage via une tablette ou smartphone, et offrant la possibilité d'exploitations poussées.





Mais ce projet ne se limite pas à la conception et à la fabrication, les équipes doivent en effet créer une écurie autour de ce véhicule avec une identité claire, rechercher des sponsors, mettre en avant leur écurie sur un stand et restituer leurs travaux à l'oral en français et en anglais. La prise en compte des contraintes environnementales doit être intégrée dans toutes les phases de ce projet.

Grâce à cet ancrage fort à l'IUT de Mantes, les élèves ne se contentent pas de fabriquer une voiture : ils deviennent, le temps d'une saison, les acteurs d'un projet industriel complet et durable.

Des compétences pluridisciplinaires :

Le projet Course en Cours constitue un véritable accélérateur d'apprentissage. Il permet aux élèves d'acquérir des compétences concrètes, alignées sur les exigences de l'industrie moderne et de l'enseignement supérieur.

- Expertise Scientifique et Technique
  Au cœur du projet, l'ingénierie est abordée de manière globale :
  - Conception Assistée par Ordinateur : utilisation d'outils professionnels de CAO mis à disposition par Dassault Systèmes (CATIA V5, Solidworks, 3DExperience)
  - Ingénierie mécanique : optimisation des formes du véhicules, choix des composants technologiques, choix des matériaux
  - Ingénierie informatique : Programmation de la carte Arduino intégrée au bloc moteur pour optimiser son fonctionnement
  - Fabrication : utilisation de Machines-Outils à Commandes Numériques (MOCN) et d'imprimante 3D
  - Physique : calculs de vitesse, optimisation des masses
  - Eco-conception : Sensibilisation aux enjeux durables via l'utilisation de matériaux recyclés et l'analyse de l'empreinte carbone (fabrication et logistique)

- Management et gestion de projet
  Le concours transforme l'équipe en une micro-entreprise opérationnelle :
  - Répartition des rôles : chaque membre de l'équipe se voit attacher un rôle (chef d'équipe, responsable conception, responsable fabrication, responsable marketing, pilote)
  - Planification : utilisation d'outils tels que le Gantt pour affecter et planifier toutes les tâches nécessaires pour mener à bien le projet, tâches s'étalant d'octobre à mai.
  - Gestion d'un budget : recherche de sponsor et gestion de celui-ci pour réaliser le véhicule, un stand et acheter une tenue en lien avec le thème de l'équipe.

- Communication et stratégie marketing
  Pour convaincre, les élèves doivent exceller dans l'art de la valorisation :
  - Identité d'équipe : recherche d'un nom d'équipe, création d'un logo et d'une identité visuelle (tenue et stand)
  - Sponsoring : réalisation de supports de communication et démarchage auprès d'entreprises
  - Réalisation d'un stand : mise en avant du véhicule et de l'identité de l'équipe
  - Présentation orale : les choix opérés doivent être présentés et justifiés lors d'une soutenance de 8 min devant un jury d'universitaires et industriels

- Au-delà de la technique, le projet forge le caractère et l'esprit d'équipe :
  - Travail en équipe : apprendre à travailler à plusieurs, à relever des défis
  - Persévérance : tout mettre en œuvre pour terminer le projet
  - Créativité : trouver des solutions efficaces et originales

Tous ces aspects sont d'abord évalués lors d'une finale régionale organisée à l'IUT de Mantes-en-Yvelines. Les meilleures équipes de chaque académie se retrouvent ensuite lors d'une finale nationale organisée depuis 2022 à la Cité des Sciences et de l'Industrie de Paris.

Un cahier des charges agile et modulable

L'une des grandes forces de Course en Cours, impulsée dès l'origine par l'IUT de Mantes, est sa capacité à s'ajuster aux réalités changeantes du terrain éducatif et de l'industrie. Le dispositif n'est pas figé ; il est conçu comme un outil vivant.

Le projet se distingue par une structure modulaire permettant aux enseignants de l'adapter selon leurs contraintes et leurs objectifs :

- Intégration pédagogique flexible et enthousiasmante **:**
  Le concours peut être déployé à l'échelle d'une classe entière, voire d'un niveau complet (toutes les classes de 3ème ou de Terminale STI2D, par exemple). Dans ce cadre, il devient un véritable fil conducteur pour les enseignements scientifiques et technologiques. Il permet d'aborder les notions du programme de manière concrète, expérimentale et transversale, tout en renforçant le sens des apprentissages.
  Il peut également être proposé sous forme de club, destiné aux élèves particulièrement passionnés. Cette configuration encourage l'autonomie, stimule la créativité et attire des profils très motivés, souvent prêts à s'investir au-delà des attentes. C'est un environnement idéal pour cultiver l'esprit scientifique dans une dynamique joyeuse et collaborative.

- Différenciation des niveaux : un défi adaptable et stimulant
  Si le cœur du projet reste la création d'une écurie, les exigences techniques et théoriques peuvent être ajustées avec finesse.
  Au collège, l'accent peut être mis sur la découverte des matériaux, les principes fondamentaux de la propulsion, ainsi que la communication et la recherche de sponsors — autant de portes d'entrée motivantes vers la démarche scientifique.
  Au lycée, les élèves peuvent aller plus loin en explorant la programmation avancée, l'optimisation numérique ou encore l'analyse aérodynamique à un niveau plus complexe.
  Cette différenciation intelligente offre un terrain de jeu équitable : les collégiens peuvent performer au même niveau que les lycéens, chacun brillant à travers des objectifs adaptés mais tout aussi exigeants. Une belle manière de célébrer la diversité des talents et la progression scientifique à chaque âge !

De nombreux parcours d'élèves remarquables

Depuis 20 ans, ce sont près de 100 000 élèves, dont 10 000 sur l'académie de Versailles, qui ont participé à ce projet né à l'IUT de Mantes-en-Yvelines. Depuis 10 ans, ce sont environ 600 élèves par an qui sont inscrits sur l'académie de Versailles et encadrés par l'IUT de Mantes-en-Yvelines.



Au fil du projet, de nombreux élèves s'épanouissent, gagnent en confiance et s'investissent avec enthousiasme dans les épreuves finales. Les enseignants qui les accompagnent tout au long de l'année sont souvent impressionnés par l'évolution de leur assurance : certains élèves, d'abord très réservés en début d'année, prennent ensuite la parole avec aisance et efficacité pour défendre leur projet devant un jury universitaire.

Beaucoup d'entre eux se découvrent, grâce à ce projet, une vocation pour une filière en lien avec les compétences développées.

Quentin, après avoir effectué Course en Cours en 1ère Technologique, a ensuite intégré la formation de DUT Génie Mécanique et Productique (GMP) à l'IUT de Mantes-en-Yvelines pour obtenir ensuite un diplôme d'ingénieur. Il a, dans la foulée, été recruté par Dassault Systèmes.

Hadrien a également intégré le DUT GMP à l'IUT de Mantes-en-Yvelines après avoir concouru à Course en Cours. Il a ensuite obtenu une Licence Professionnel en Conception Numérique en Design et travaille actuellement au service Design de Renault.

D'autres participants se sont orientés vers des filières de communication ou de marketing, poursuivant des parcours cohérents avec les compétences et passions révélées au cours du projet.



Les temps forts d'une année Course en Cours dans l'académie de Versailles

Les équipes enseignantes et les étudiants de l'IUT de Mantes-en-Yvelines encadrent tout au long de l'année les équipes de collégiens et lycéens, le plus souvent par l'intermédiaire de leur enseignant référent et parfois en direct avec les élèves.

Voici quelques temps forts proposés dans le cadre de l'encadrement :



- Journée « Découverte de la chaîne numérique »

Tous les élèves inscrits à Course en Cours sont invités. Lors de cette journée, les élèves découvrent, au travers de différents ateliers animés par les étudiants inscrits en BUT Génie Mécanique et Productique (GMP), les filières et métiers directement en lien avec Course en Cours. Les élèves ont également la possibilité, pour la première fois, de réaliser des courses sur la piste officielle de l'IUT de Mantes-en-Yvelines. Cette journée est également l'occasion d'échanges constructifs entre élèves et étudiants, ouvrant des perspectives d'études aux plus jeunes. C'est en ce sens un moment très important dans la cadre de la Cordée de la Réussite Course en Cours.

- Finale régionale
  Les 20 meilleures équipes de l'académie de Versailles viennent s'affronter. Ces équipes sont évaluées non seulement sur l'efficacité de leur véhicule, sur le design de celui-ci, mais également par un jury qui évalue leur stand et lors d'une soutenance.
- Journée Nationale des Cordées de la Réussite
  Labellisé Cordée de la Réussite depuis une dizaine d'années, l'accompagnement proposé par l'IUT de Mantes-en-Yvelines permet aux élèves de participer à cette journée nationale. Ils assistent à des conférences variées portant sur l'estime de soi, la découverte de métiers, le travail en équipe…
- Formation au logiciel 3DExperience
  Une journée de formation est proposée aux enseignants des collèges et lycées afin de les aider à prendre en main le logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) 3DExperience, indispensable pour accompagner ensuite leurs élèves dans leur projet.

Un projet majeur et fédérateur à l'IUT de Mantes-en-Yvelines

Une très grande partie de la communauté universitaire de l'IUT est impliquée dans l'organisation de ces manifestations, qui sont des événements majeurs dans la vie de l'IUT de Mantes-en-Yvelines :

- Une implication forte des étudiants
  Des étudiants de BUT Génie Mécanique et Productique et de BUT Techniques de Commercialisation sont impliqués dans l'encadrement des élèves et dans la communication réalisée autour de ces événements.
- Une mobilisation collective du personnel
  L'ensemble du personnel de l'IUT, administratifs et enseignants de tous les départements participent aux différents jurys. C'est un moment de convivialité attendu par beaucoup favorisant la cohésion des équipes

Pour toutes ces raisons, après avoir créé Course en Cours il y a 20 ans, l'IUT de Mantes n'a jamais cessé d'en être un acteur majeur et continuera de l'être…

Rendez-vous le mardi 12 mai 2026 à l'IUT de Mantes en Yvelines pour la 20ème finale régionale de l'académie de Versailles de Course en Cours !



10 PRÉSENTATION D'UN OUVRAGE

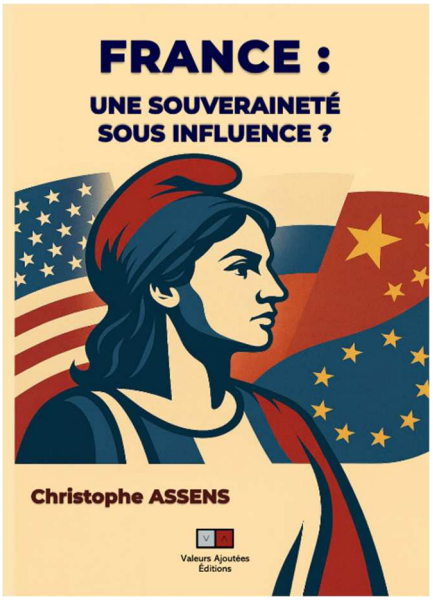
France : une souveraineté sous influence ? Ed. VA



Pr. Christophe ASSENS
Professeur des Universités
UVSQ - LEMEEPS-PS

Biographie de l'auteur

Professeur des universités à Versailles Saint Quentin en Yvelines, membre du laboratoire LIMEEP-PS, Christophe Assens est spécialiste de stratégie et titulaire de la chaire réseaux et Innovations. Lauréat du Prix Manpower HEC Paris et du Prix académique Syntec, il explore depuis plus de 30 ans les dynamiques de pouvoir, de confiance et d'influence dans les réseaux.



Cet essai est le premier volet d'un triptyque littéraire consacré à l'analyse stratégique de la France sur la période contemporaine. Il bénéficie d'un avant-propos de Nicolas MOINET, d'une préface d'Alain JUILLET et d'une postface de Aude de KERROS[72].

Depuis le choc pétrolier des années soixante-dix, la France vit au-dessus de ses moyens en exploitant une rente économique, découlant des investissements de long terme instaurés par le général de Gaulle, à l'image du programme nucléaire garantissant la souveraineté énergétique et la dissuasion militaire du pays.

Néanmoins, cette rente est insuffisante pour financer un modèle social de plus en plus coûteux à cause de l'augmentation du chômage de masse, de la baisse démographique et de l'allongement de l'espérance de vie. Aujourd'hui, la France est un pays surendetté mis sous tutelle par les marchés financiers[73], un pays en perte de croissance, profondément désindustrialisé pour favoriser la consommation de produits importés à bas prix. Par voie de

[72] **Avant-propos de Nicolas MOINET** : professeur des universités à l'IAE de Poitiers, il est l'un des cofondateurs de l'École de pensée sur la guerre économique. Il est également chercheur associé au CR 451, le centre de recherche de l'École de Guerre Économique. **Préface d'Alain JUILLET** : ancien haut responsable chargé de l'intelligence économique au Secrétariat Général de la Défense Nationale, sous l'égide du Premier ministre. **Postface d'Aude de KERROS** : peintre, graveur, critique d'art et essayiste française. Comme essayiste, elle participe notamment par des articles et des ouvrages au décryptage et à l'analyse du monde de l'art et du marché de l'art.

conséquence, l'État français est confronté à des difficultés économiques insoutenables pour assurer le régalien et la plupart des missions de service public. Ce déclassement de la France se déroule au plus mauvais moment, alors que le nouvel ordre mondial repose sur la prédation des pays forts à l'égard des pays vulnérables, en faisant fi du droit international.

Le livre examine cette situation préoccupante sous l'angle géopolitique, en posant une question centrale : la France est-elle toujours maître de son destin ? Dans un monde marqué par la rivalité de puissances, la souveraineté nationale devrait servir de boussole pour guider et orienter la politique du pays. À la lecture du livre, nous constatons que cette boussole oriente insuffisamment l'action publique.

Tout d'abord, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, la France délègue des pans entiers de sa souveraineté nationale à l'union européenne. Or, en l'espace de 50 ans l'Union Européenne a évolué d'une structure de coopération industrielle au sein d'un marché unique vers une Europe fédérale uniformisant les 27 pays membres sous l'effet d'une inflation normative. Gouvernée par la technostructure, l'Europe fédérale ne joue pas de rôle moteur pour valoriser l'alliance des pays membres. Elle vise à assurer une tutelle administrative, y compris dans les fonctions régaliennes : la justice, la sécurité, la défense, le renseignement. Elle érige un cordon juridique, en plaçant le droit européen au-dessus des juridictions nationales. Résultat, la surcharge normative en Europe alourdit le coût du travail et les délais de conformité, en dissuadant l'investissement industriel. Dans ces conditions, l'Europe fédérale est confrontée à une crise économique sans précédent. Par exemple, le pouvoir d'achat par habitant en Europe a été divisé par deux sur les 20 dernières années, par comparaison avec les États-Unis.

Dans cette Europe normative où l'amitié des peuples est remplacée par l'harmonisation des règles, chaque pays joue cavalier seul. De la sorte, la plupart des coopérations scientifiques et industrielles sont en panne, à l'image du projet symbolique d'avion de chasse du futur - le SCAF, porté initialement par le couple franco-allemand. Dans ces conditions, l'Europe technocratique est incapable de permettre aux pays membres de faire bloc face à la compétition des superpuissances, de la taille d'un continent. Cette division de l'Europe a des conséquences. L'ouvrage montre comment la France perd son influence en Afrique francophone, au profit d'un compétiteur comme la Russie qui exploite la rente mémorielle anticolonialiste contre la France, dans une guerre de l'information auprès de l'opinion publique africaine. Le remplacement de la France en Afrique par la Russie ou la Chine se déroule dans l'indifférence de l'Europe.

L'Europe est ainsi devenue particulièrement vulnérable, en se détournant des enjeux de puissance économique et militaire. En effet, l'agenda de l'Europe repose principalement sur les causes sociales (diversité, équité, inclusion) et environnementales (réchauffement

[73] En 2026, le taux d'endettement public est supérieur à 3 500 milliards d'euros soit 117 % du PIB. Cela correspond à un emprunt de 51400 euros pesant sur chaque français. La France emprunte au taux historique de 4 % à horizon 10 ans sur le marché obligataire (obligations assimilables au Trésor). Dès lors, la charge de la dette représente 74 milliards d'euros (8 % du budget total), soit le premier poste de dépense de l'État, devant le budget de la justice, de la santé, de l'éducation ou de la Défense. La majorité des créanciers de la dette française, à hauteur de 56 %, sont non-résidents fiscaux. Cela signifie que la dette française est détenue en grande partie par les compétiteurs de la France comme la Russie, les États-Unis ou la Chine, qui peuvent de cette manière exercer une pression sur la politique extérieure du pays. La réciproque n'est pas vraie.

climatique) pendant que les compétiteurs dans le reste du monde investissent massivement dans la défense militaire et les technologies du futur pour asseoir leur suprématie mondiale.

Pour illustrer ce décalage, l'ouvrage met l'accent sur la bataille technologique autour de l'Intelligence Artificielle (IA) qui oppose actuellement la Chine aux États-Unis. L'IA est une arme géopolitique majeure au XXIe siècle. Elle incarne la souveraineté d'un État puissance. Elle est utilisée pour moderniser l'armée à travers la robotisation, la surveillance de masse et l'utilisation des drones intelligents. Elle sert à accélérer la productivité des entreprises. Elle conditionne l'accès à l'information en prenant progressivement la place des médias traditionnels, y compris la place prépondérante des réseaux sociaux ou des moteurs de recherche. En conséquence, l'IA incarne un pouvoir d'influence sans précédent, capable de déterminer les choix de consommation en contournant les règles de la concurrence sur le marché, et capable d'orienter le résultat des élections au-delà du débat démocratique.

Face à ces enjeux, l'ouvrage montre comment les États-Unis et la Chine déploient leurs rouages diplomatiques, militaires et économiques pour atteindre la suprématie technologique mondiale en matière d'IA. Cette compétition trouve des prolongements naturels dans la confrontation géopolitique à Taïwan, en Iran, en Ukraine, au Vénézuela, au Groënland, au Soudan, au Congo et dans d'autres régions du globe sous tension. Elle est l'expression d'un seul et même objectif : imposer au reste du monde la dépendance d'une IA américaine ou chinoise.

En l'absence de souveraineté dans l'IA, la France et l'Europe subissent une dépendance technologique qui conditionne la bonne santé des entreprises, l'évolution des démocraties, les choix de consommation, l'orientation culturelle, la liberté de pensée. Cette dépendance est préoccupante à une époque où le niveau d'instruction de la jeunesse diminue. Les lacunes dans la connaissance sont progressivement remplacées par l'utilisation de l'IA qui joue le rôle d'une prothèse cognitive. Dans ces conditions, l'IA ne démocratise pas l'accès au savoir. L'IA accélère au contraire le fossé entre ceux qui maîtrisent l'outil grâce à un niveau d'instruction solide fondé sur la culture de l'écrit, et ceux qui subissent l'outil en raison d'une disparition de l'effort intellectuel emporté par la culture de l'image. À terme, le risque est de perdre l'esprit critique dans le débat démocratique, au profit d'une réalité politique conçue par un outil relevant de l'ingérence étrangère. L'atteinte à la souveraineté est insidieuse, car elle se manifeste dans les habitudes du quotidien, dans les petits renoncements soumis à la paresse intellectuelle, et non pas dans une déclaration de guerre imposant d'affronter la réalité.

La bataille technologique est devenue l'une des conditions d'existence de la puissance publique et de la liberté d'action au XXIe siècle. Comment relever ce défi ? Dans l'histoire des relations internationales, la doctrine sur l'action publique consiste à préserver les intérêts nationaux envers et contre tous, comme le précise Henry John TEMPLE (1848) « *We have no eternal allies, and we have no perpetual enemies. Our interests are eternal and perpetual, and those interests it is our duty to follow*. » et comme le concède le général de Gaulle « *Les États n'ont pas d'amis, ils n'ont que des intérêts* ». La difficulté pour la France est de sortir de cette conception restrictive de la souveraineté, pour défendre le besoin d'indépendance avec l'aide de pays partenaires. En effet, sur certains sujets nécessitant une taille critique mondiale comme l'intelligence artificielle, la France est trop petite pour rivaliser en restant seule. Dès lors, elle doit convaincre ses alliés en Europe de relever le défi de puissance dans les domaines stratégiques : ordinateur quantique, fusion nucléaire, conquête spatiale, Intelligence Artificielle, industrie du futur, réalité augmentée du champ de bataille.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs questions se posent : Comment être uni en Europe en préservant la souveraineté de chaque État ? Comment remplacer les dépendances extérieures par des dépendances croisées en Europe ? Comment valoriser les différences en Europe sans vouloir uniformiser à outrance ?

À cette fin, il faut éviter deux écueils : celui d'une Europe fédérale qui remplace le droit des peuples à disposer d'eux-mêmes par des règles bureaucratiques incitant non pas à la coopération, mais à la soumission au pouvoir administratif traversé par l'influence des superpuissances non européennes ; celui d'une Europe des nations qui prône le repli sur soi pour restaurer la souveraineté des peuples face à la technocratie, au risque d'être divisé face aux superpuissances comme les États-Unis ou la Chine. En définitive, l'Europe doit se comporter comme un réseau d'États-Nations, où l'amitié des peuples sert de ciment à la coopération internationale dans l'intérêt commun. Les réseaux d'alliance façonnent aujourd'hui les rapports de force. Les réseaux sont non pas uniquement des outils de communication mais des instruments de puissance géopolitique. De ce point de vue, l'ouvrage fournit une grille de lecture singulière pour comprendre l'origine et l'évolution historique des réseaux, en montrant dans quelle mesure ils permettent de bâtir la souveraineté au XXIe siècle, en sélectionnant et en fidélisant des partenaires de confiance, sur le long terme.

UVSQ université PARIS-SACLAY | Mantes Recherche
CAMPUS DE MANTES EN YVELINES

Pour nous soumettre un article :

Soumissions et contact

mantesrecherche@uvsq.fr

www.iut-mantes.uvsq.fr

Adresse

IUT de Mantes-en-Yvelines

7 rue Jean Hoët - 78200 Mantes-la-Jolie

UVSQ - Université Paris-Saclay

ISSN imprimé (en cours d'acquisition) | ISSN en ligne (en cours d'acquisition
Dépôt légal : Novembre 2026 - Imprimé en France
Éditeur : Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, IUT de Mantes, 7 rue Jean Hoët 78200 Mantes-la-Jolie, France
© 2026 - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Directeur de la Publication : Pr. Benoît PETIT
Rédacteur en Chef : Guillaume MARTIN