

Ecole doctorale – Université de Nantes

Réponse à l'appel à sujets de thèse

1. Sujet de thèse

Modélisation des symbioses industrielles par la dynamique d'un écosystème énergétique et la performance des clusters d'innovation. Application à la production d'hydrogène

2. Encadrants

Mathias GUERINEAU – MCF en sciences de gestion – énergie et management de l'innovation

Rodica LOISEL – MCF HDR en économie – énergie et environnement

Rodica Loisel encadre une thèse cifre sur l'économie du stockage d'énergie (Antoine Debille chez Segula Technologies, co-encadrement avec Lionel Lemiale - LEMNA) et co-encadre une thèse sur les réseaux intelligents (Racine Diatta, co-encadrement avec Muriel Travers et Lionel Richefort - LEMNA). Un autre co-encadrement a été mené à terme en octobre 2020 au sein du laboratoire IREENA, portant sur les systèmes énergétiques en mer (Asma Dababbi, co-encadrement avec Salvy Bourguet et Mohamed Machmoum).

3. Description du sujet de thèse

Contexte. Les changements technologiques auxquels sont confrontés les industriels depuis une dizaine d'années sont la résultante de plusieurs vecteurs tels les chocs de prix des matières premières, énergétiques en particulier, et les objectifs politiques environnementaux et stratégiques de transition vers une société sobre et décarbonée (LTECV, 2015 ; SNBC, 2020). L'économie industrielle intègre de ce fait de nouveaux domaines d'étude tels les changements technologiques adaptés aux nouvelles problématiques axées sur les économies d'énergie et la diversification des sources d'approvisionnement, et connaît également une plus grande ouverture thématique et méthodologique. Cette ouverture a bénéficié des apports théoriques de l'écologie industrielle et des autres disciplines, dont les sciences de la gestion, pour compléter le cadre normatif économique par des outils opérationnels managériaux, et s'attaquer ainsi à la complexité des choix des industriels en matière d'éco-innovation et de stratégies d'innovation.

Problématique. Nous examinons ces nouveaux champs de recherche au sein de l'économie industrielle, sous l'angle des **symbioses industrielles**, qui représentent un réseau d'échange entre différentes firmes et visent le bouclage des flux de matière et d'énergie à l'intérieur d'une zone d'activité industrielle (Diemer, 2016). Différentes formes de coordination peuvent être définies et lorsqu'elles couvrent l'échange de ressources, elles prennent en compte trois options : la réutilisation des produits, le partage d'infrastructure et la fourniture conjointe de services. La symbiose industrielle à laquelle nous nous intéressons apparaît sous les traits d'un partage de réseau, notamment pour l'approvisionnement énergétique, par la mise en place d'une infrastructure locale de production, de stockage et de transport

d'hydrogène. D'autres avantages pourraient émerger suite à la mise en place d'une routine d'échanges entre les entreprises, liée à la gestion des déchets et à la circulation des flux géochimiques dans une vision entropique de l'éco-système (Georgescu-Roegen, 1995) ; l'analyse se focalisera sur le partage du service énergétique uniquement.

Le management de l'innovation étudiera les conditions de la mise en place de cette infrastructure innovante à plusieurs niveaux : la création des synergies énergétiques pour l'organisation d'une plateforme de production d'énergie renouvelable et de transformation en vecteur hydrogène ; la mise en place d'une politique d'approvisionnement local en énergie verte et décarbonée, mais à faible coût d'opportunité à l'image des énergies fossiles, dont les prix n'internalisent pas la rareté avant 2025 ; et le changement technologique nécessaire aux appareils productifs des industriels afin d'assurer la liquidité d'un marché émergent tel l'hydrogène. La théorie des cycles technologiques (Markard, 2020 ; Bergek et al., 2008) sera mobilisée pour étudier les facteurs de succès et d'échec des clusters d'innovation, liés au contexte économique, organisationnel et territorial. La symbiose industrielle énergétique sera ainsi liée à son environnement, par les caractéristiques de performance globale d'une collectivité (environnementale, économique, sociale, culturelle), où la volonté de collaboration entre acteurs dépendra du sens de leurs relations historiques, tant entre les entreprises qu'avec les acteurs politiques, et des changements à venir dans la structure de demande et de production, tournée vers plus de circularité.

Objectifs. L'objectif de cette thèse est de contribuer à la littérature existante en économie industrielle pour analyser le rôle de l'énergie dans les secteurs sur un territoire donné, et la spécificité des facteurs territoriaux qui facilitent ou retardent l'adoption de nouveaux vecteurs énergétiques tel l'hydrogène.

Peu d'études relient le rôle moteur d'un cluster d'innovation énergétique à l'opportunité de création des synergies entre les acteurs et les processus. Des modèles sont dédiés à l'étude de production d'énergie renouvelable par les industriels et les possibilités d'échange des surplus dans le cadre des communautés énergétiques locales (Noori et al., 2021 ; Butturi et al., 2019 ; Gu et al., 2013). D'autres s'intéressent à la dynamique des clusters d'innovation qui réunissent des acteurs impliqués à des différents niveaux de la chaîne de valeur de certains services (télécommunication, informatique ; Crespo Cepas, 2013 ; Laffi et Boschma, 2021). Nous proposons un modèle qui place le cluster au sein de la symbiose industrielle pour l'alimentation en énergie des acteurs locaux qui assurent de facto une demande pérenne et croissante en input hydrogène. La question du développement de masse de l'hydrogène est ainsi soulignée pour analyser les facteurs de succès ou d'échecs du cluster H₂, en misant sur la symbiose industrielle en tant que vecteur demande pour le cluster dans un avenir proche avec peu d'alternatives énergétiques.

Dans une *première partie*, le projet décrit les relations sectorielles de types input-output pour pouvoir faire le lien entre les relations économiques du territoire étudié et ses ressources énergétiques, locales et importées. Le périmètre d'étude sera la région des Pays de la Loire à fort potentiel énergétique, terrestre et maritime, et dont la dynamique *lente* de la filière hydrogène contraste avec la volonté politique *forte* de placer l'hydrogène au cœur de la mobilité et de l'énergie durables (exemple les applications maritimes, fluviales et stationnaires ligériennes NavHybus, SEP-PAC, MuLTHy, DeltaGreen, Minerve, etc.).

La modélisation Entrées-Sorties semble adaptée à la description des relations économiques et des dépendances énergétiques, avec une extension envisageable à l'environnement pour mesurer l'empreinte carbone de l'économie territoriale. L'objectif est double : de quantifier l'intensité énergétique des acteurs locaux ; et de pouvoir ensuite intégrer les évolutions technologiques et sociétales via la projection de long terme. Les avantages environnementaux seront comptabilisés sur la base de la capacité d'un input alternatif, tel l'hydrogène vert, à réduire la consommation d'énergie sur la chaîne initiale de production et

transport d'input fossile, et par le biais d'effets de substitution, avec des économies directes et indirectes liées à l'approvisionnement de proximité. L'outil Input-Output (Leontief, 1970) apparaît ainsi essentiel pour décrire les actions s'inscrivant dans une transition énergétique et écologique durable (Pantet, 2020). Ces relations futures seront analysées dans un scénario de développement organisationnel s'inscrivant dans les forces de symbioses industrielles au sens de l'économie circulaire comme modèle sociétal de production et de consommation inhérent dans le monde et en France (FREC, 2019).¹

Selon le modèle danois de Kalundborg (Diemer, 2016), le réseau ligérien de la symbiose industrielle sera caractérisé par le type d'input énergétique (électricité ou énergie primaire), par la taille des entreprises et le degré de centralisation que pourrait jouer un seul point d'approvisionnement en hydrogène, et par la proximité géographique des acteurs qui rendrait réaliste le modèle de production d'hydrogène centralisé, ou à défaut distribué, au sein du territoire.

Dans une *deuxième partie*, la thèse analysera les forces qui déterminent la performance d'un cluster énergétique autour du vecteur hydrogène. Le point de départ est la question des leviers de développement des clusters d'innovation pourra être la dotation initiale en brevets des acteurs locaux ainsi que la parenté technologique avec les bases de connaissances régionales, approche permettant d'expliquer l'émergence des technologies d'un point de vue des connaissances (Balland et Boschma, 2019 ; Tanner, 2016). La thèse analysera donc les forces propices au démarrage d'un cycle technologique dont la résilience sera fonction de la structure industrielle territoriale et des politiques publiques nationales et surtout régionales. Il sera aussi pertinent de voir comment les interventions réglementaires auront un effet de concentration des clusters dans des zones à spécificités énergétiques, scientifiques ou industrielles dont la définition influera sur la localisation des centres de production et de consommation d'hydrogène.

Le projet doctoral proposera une représentation du cycle technologique de l'hydrogène, en partant de la construction d'une large base de données logistiques et économiques, qui permettra d'analyser et d'anticiper les forces nécessaires à la consolidation théorique d'un écosystème viable. Nous chercherons à comprendre les conditions de couplage ou d'amplification des effets réseau entre l'offre et la demande d'hydrogène, pour mettre en perspectives les différentes hypothèses d'émergence d'un marché local de l'hydrogène qui minimiseraient les contraintes liées aux coûts de transaction. Dans cette perspective nous pourrions analyser le croisement de la filière fluvio-maritime en particulier à l'émergence d'écosystèmes régionaux en ciblant les opérateurs existants et potentiels autour des grands centres maritimes (le grand Port de Nantes Saint-Nazaire) et de petits et nombreux points d'approvisionnement (Turballe, Bouin, etc.). Enfin, la thèse analysera finement les modalités d'actions permettant l'alignement des différents acteurs qui composent ces écosystèmes naissants (gouvernance, construction d'un discours et d'une représentation partagée, formes de collaboration et modalités contractuelles de création et partage de la valeur, etc.) et les (ré)actions possibles à mettre en place face aux éléments plus exogènes (traitement des technologies ou écosystèmes « concurrents », gestion des parties prenantes externes, alignement avec les instances centrales et européennes, lobbys, etc.).

Dans une *troisième partie*, le projet mobilisera d'autres bases de données, lorsque disponibles, pour tester la robustesse de la méthode et son degré de transposabilité à d'autres périmètres économiques. La thèse cherchera à mieux définir les caractéristiques des territoires qui permettent d'accélérer la création des clusters énergétiques, à savoir si les échanges symbiotiques émergent de manière spontanée et si on peut planifier un modèle de symbiose industrielle. Contrairement aux recherches empiriques qui tendent à

¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/feuille-route-economie-circulaire-frec>

montrer que les tentatives de planification des parcs industriels débouchent rarement sur des organisations pérennes (Beaurain, Brulot, 2011), notre thèse défend l'idée que l'inertie de l'investissement des industriels pour passer à l'hydrogène vert (maritime, raffinerie, aviation, etc) de par la forte spécificité de leurs actifs, encapsuleront les entreprises du cluster H2 dans une relation contractuelle de long terme. Les vecteurs de succès de ce modèle sont notamment contestables en amont de la mise en place de l'infrastructure d'hydrogène, qui dépend fortement de la mobilisation politique et de quelques grands acteurs énergétiques et industriels locaux. Leur coopération sera basée sur des principes de proximité et de non-concurrence puisque du fait de leurs secteurs d'activités, ils couvrent des segments de marché différents, tout au plus complémentaires. L'approche par les écosystèmes (Adner, 2017) nous semble donc être une clé d'entrée pertinente afin de prendre en compte ces proximités générées par le développement de la filière H2 entre différentes chaînes de valeurs et filière. Enfin, nous défendons l'objectif de développer des outils d'aide à la décision en adéquation avec la décentralisation et le rôle croissant des territoires dans la mise en place de la stratégie énergétique et climatique type PCAET. Ainsi la planification régionale formelle sera de plus en plus institutionnalisée et pourra contribuer au succès de l'apparition d'une symbiose pour le moins externe lorsqu'elle est basée uniquement sur le partage d'infrastructure.

Compétences. Le projet doctoral mobilise l'expertise et l'expérience de travail et de modélisation en économie et en science de gestion dans le domaine de l'hydrogène des encadrants.

En économie de l'hydrogène, Rodica Loisel s'est intéressée à l'infrastructure nécessaire pour assurer la continuité de la fourniture, à l'aide des modèles en équilibre sectoriel partiel, à travers le projet mené au Lemna avec CEA-tech, MHyWind, 2018-2020 (Dimensionnement et optimisation du pilotage d'une chaîne de production hydrogène couplée à un parc éolien offshore). Ce projet a traité des conditions qui pallient l'intermittence des énergies renouvelables pour la production de l'hydrogène, via le stockage, pour satisfaire une demande hétérogène en termes d'élasticités par vecteur énergétique (chauffage, carburant et électricité). Le projet a également pris en compte les coûts d'opportunité des substituts proches de l'hydrogène, compte tenu des externalités positives telle l'abondance relative et le faible coefficient d'émissions de carbone sur le cycle de vie de l'H2 ; et aux coûts de transaction dans le phénomène de cumul des usages (appelé aussi *cross-sectoring*).

En sciences de gestion, Mathias Guérineau a travaillé sur les modalités d'actions collectives mises en place pour soutenir ou au contraire bloquer le développement d'innovation ou d'écosystème naissant (projets impliquant les acteurs RTE, Renault avec Univ. Paris 3 sur l'énergie en général). À travers le concept clé de *general purpose technology*, son analyse a pu proposer d'un point de vue théorique différents types de stratégie d'écosystèmes à mettre en œuvre pour étudier le déploiement et la diffusion de la technologie H2. Différentes méthodes ont permis de comprendre les relations qui existent dans ces écosystèmes naissants (les liens avec par exemple les énergéticiens, les gestionnaires de réseau, etc.), des facteurs d'inertie (politique, coordination inter et intra organisationnelle, etc.) et plus généralement un regard sur « la bataille de standard » qui est en cours avec les autres technologies au cœur de la transition énergétique (batterie, autres gaz, air comprimé, etc.).

Actuellement, les deux chercheurs travaillent ensemble sur la construction d'une base de données dans la région des Pays de la Loire, pour cartographier les acteurs majeurs impliqués dans l'infrastructure d'hydrogène, en particulier les énergéticiens et les industriels gros consommateurs d'énergie (électricité,

combustible et hydrogène par vaporéformage). Ils ont lancé, sur un financement d'IUML, un appel à candidatures pour un poste de chargé(e) d'études prospectives sur l'hydrogène.²

4. Positionnement par rapport aux axes scientifiques du laboratoire

Le sujet s'inscrit principalement dans l'axe Défis Environnementaux, Mer et Energie. Le sujet correspond à la partie Energie avec un ancrage thématique dans l'Environnement et la Mer lorsque l'application mobilise des sources énergétiques en mer, et le transport maritime pour l'expression de la demande de mobilité décarbonée. L'approche théorique fait la jonction entre l'économie industrielle, par l'étude des relations intersectorielles, et les outils du management de l'innovation dans l'évaluation de la dynamique des clusters, avec un regard empirique sur le secteur énergétique. En ce sens, le projet entre aussi en synergie avec l'axe « Numérique et transformation des organisations » qui développe en son sein des projets de recherche sur l'innovation et les transitions. Il y a donc plusieurs chercheurs du laboratoire qui mènent leurs travaux sur des thèmes similaires ou connexes ce qui alimentera les échanges autour du projet ; tandis que des forces extérieures auront un effet d'entraînement sur l'équipe et la dynamique du doctorant, par exemple le réseau France Energies Marines, avec lequel les encadrants développent des études pluridisciplinaires avec de nombreux industriels et partenaires académiques (le projet Opharm – Offshore Hydrogen Productions Project).

5. Références bibliographiques

5.1. Publications méthodologiques

Adner, R. 2017. Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy. *Journal of management*, 43(1), 39-58.

Balland PA, Ron Boschma, 2019. Mapping the potentials of regions in Europe to contribute to new knowledge production in Industry 4.0 technologies. Ed. Taylor and Francis Online

Bergek, A., Jacobsson, S., Carlsson, B., Lindmark, S., & Rickne, A. 2008. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. *Research policy*, 37(3), 407-429.

Beaurain C, Brullot S, 2011. L'écologie industrielle comme processus de développement territorial : une lecture par la proximité. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* (2) : 313-340.

Butturi MA, F. Lolli, M.A. Sellitto, E. Balugani, R. Gamberini, B. Rimini, Renewable energy in eco-industrial parks and urban-industrial symbiosis: A literature review and a conceptual synthesis. *Applied Energy*

Crespo Cepas J, 2013. Understanding cluster dynamics in evolutionary economic geography: essays on the structure of networks and clusters life style. Thèse de doctorat. Toulouse Capitole.

Diemer A, 2016. Les symbioses industrielles : un nouveau champ d'analyse pour l'économie industrielle. *Innovation* 2(50) : 65-94.

Gu C, Leveueur S, Estel L, Yassine A, 2013. Industrial Symbiosis Optimization Control Model for the exchanges of the material/energy flows in an industrial production park. 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control International Federation of Automatic Control. Saint Petersburg, Russia.

Laffi M, Boschma R, 2021. Does a local knowledge base in Industry 3.0 foster diversification in Industry 4.0 technologies? Evidence from European regions. *Papers in Evolutionary Economic Geography* # 21.12. Utrecht University.

²https://lemna.univ-nantes.fr/medias/fichier/63747-charge-e-etudes-economiques_1618250557287-pdf?ID_FICHE=926520&INLINE=FALSE

Markard, J. 2020. The life cycle of technological innovation systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119407.

Noori S, Korevaar G, Ramirez AR, 2021. Assessing industrial symbiosis potential in Emerging Industrial Clusters: The case of Persian Gulf Mining and metal industries special economic zone. *J. of Cleaner Prod* 280(1): 124765.

Pantet J, 2020. Utilisation de l'estuaire de la Seine par l'économie régionale: Modélisation Entrées-Sorties étendue à l'environnement et perspectives pour 2050. *Economies et finances*. Normandie Université.

Tanner, A. N. 2016. The emergence of new technology-based industries: the case of fuel cells and its technological relatedness to regional knowledge bases. *Journal of Economic Geography*, 16(3), 611-635.

5.2. Publications des encadrants en lien avec le projet doctoral

Loisel R, C. Simon, M. Woznicki, M. Guérineau, L. Baranger, E. Schaeffer, L. Lemiale, G. Le Solliec. 2019. Green hydrogen multi-market optimisation: real complementarities or temporary transaction costs? *IEEE Transactions on Engineering Management* (proceeding to conference OSES).

Loisel R., Simon C., 2021. Market strategies for large-scale energy storage: vertical integration versus stand-alone player. *Energy Policy* 151: 112169.

Guérineau M. & Mayer J. "Turning hydrogen into a market: ecosystem strategies in France", *AIMS, GTInnovation*, 2019.

Loisel R, Baranger L, Chemouri N, Pardo S, 2015, Economic evaluation of hybrid off-shore wind power and hydrogen storage system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(21): 6727-39.

Lemiale L, R. **Loisel**, S. Bourguet, A. Roy, M. Machmoun. 2019. Building sustainable power mix in small island grids: a multi-criteria analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management* (proceeding to conference OSES).

Loisel R, Lemiale L, 2018, Comparative energy scenarios: solving the capacity sizing problem on the French Atlantic Island of Yeu, *Renewable & Sust. Energy Reviews* 88:54-67.

Guérineau M., Ben Mahmoud-Jouini S., Charue-Duboc F. (2015). « Différencier les contributions des filiales d'une multinationale en matière d'innovation », *Management International/International Management/Gestión Internacional*, 19(4) pp34-48 (rang 2 FNEGE, rang 3 CNRS, A HCERES).

Guérineau M., Ben Mahmoud-Jouini S., Charue-Duboc F. (2017), « Le rôle des communautés de pratiques et de leur coordination dans le développement et le déploiement des innovations dans une multinationale », *Management International/International Management/Gestión Internacional*, 21(3) pp18-34 (rang 2 FNEGE, rang 3 CNRS, A HCERES).

Debille A, C. Simon, R. **Loisel**, D. Guyomarc'h, T. Neu, L. Lemiale. 2019. Underwater CAES assessment: economic and engineering references for energy mix sizing in islands grids. *IEEE Transactions on Engineering Management* (proceeding to conference OSES).

Guérineau M. Coordonner la phase aval du processus d'innovation dans les FMN : quelle place pour une fonction de chef de projet déploiement, Working Paper.

Guerineau M. & J. Mayer. "Doing good" in an age of planetary boundaries: theorizing sufficiency as a new organizing design, *AMR STF Workshop*, 2021.

Loisel R, Sanchez M, Schoefs F, Gaillard A, 2018, Integration of tidal range energy with undersea pumped storage, *Renewable Energy* 126: 38-48.