



Résumé du Rapport

Étude de faisabilité Région d'innovation de Fessenheim
2021 – 2022

Édité par Barbara Koch

Principaux auteurs

Barbara Koch
Zeina Najjar

Matthias Vetter
Ingo Krossing

Maximilian Schmucker
Thomas Jordan

Loic Tachet
Alain Dieterlen

Dominique Badariotti
Fanny Greullet



Financé par



Préambule

Le projet pour l'Avenir du Territoire de Fessenheim, adopté en 2019, exprime « l'ambition commune de faire émerger un territoire européen bas carbone reposant sur des filières d'excellence et d'innovation créatrices d'emplois et de valeur ajoutée, associant citoyens, entreprises, acteurs de la recherche et institutionnels ».

C'est dans ce contexte que l'Etat français, la Région Grand Est, l'Etat fédéral allemand et le Land Bade-Wurtemberg ont soutenu la conduite de l'étude de faisabilité « Région d'innovation de Fessenheim ».

Cette étude a été réalisée par le Groupement européen de coopération territoriale (GECT) « Eucor – Le Campus européen » en coordination avec le Cluster de recherche en durabilité du Rhin supérieur.

Aujourd'hui, l'Etat français, la Région Grand Est, l'Etat fédéral allemand et le Land Bade-Wurtemberg remercient l'ensemble des équipes scientifiques mobilisées sur cette action ambitieuse, tout comme les acteurs économiques qui y ont contribué. Ils saluent la qualité des travaux pluridisciplinaires menés au cours de ces derniers 18 mois.

L'étude, les recommandations et les projets pilotes esquissés sont le fruit d'un travail collaboratif entre experts. Ils sont présentés aux décideurs publics, financeurs de l'étude, et ne sauraient engager l'État français, la Région Grand Est, l'État fédéral allemand ou le Land de Bade Wurtemberg. Ils constituent une base de réflexion destinée à nourrir les échanges à venir entre institutionnels et partenaires du Rhin supérieur. Dans le cadre des orientations politiques de chacun des financeurs, les conclusions de l'étude pourront contribuer, en lien avec le monde économique, à la transformation du territoire de Fessenheim.

République française

La préfète



Josiane CHEVALIER

Josiane CHEVALIER

Préfète de la région Grand Est, Préfète du Bas-Rhin

Région Grand Est



Jean ROTTNER

Président de la région Grand Est

Ministère fédéral de l'Intérieur et du Territoire



Jörn Thießen

Directeur, Direction générale H - Territoire, cohésion
et démocratie

Ministère des Sciences, de la Recherche et de l'Art du Land de Bade Wurtemberg



Dr. Hans J. REITER

Chef de cabinet



L'étude de faisabilité vise à identifier des voies de transformation viables pour le secteur de l'énergie connecté à une industrie durable orientée vers l'avenir, intégrant des études pertinentes, des partenaires scientifiques et parties prenantes de la société ainsi que de l'industrie/de l'économie.

Barbara Koch

Sommaire

01.	Introduction	3
02.	Atouts régionaux et locaux pour la région d'innovation de Fessenheim	5
03.	Potentiels en matière d'énergies renouvelables dans la région du Rhin supérieur	6
04.	Batteries vertes et économie circulaire	9
05.	Centre multimodal de l'hydrogène à Fessenheim	10
06.	Réseaux intelligents	14
07.	Cadre territorial	17
08.	Conclusion	19

01. Introduction

La nécessité du développement durable a dominé le discours sur la politique environnementale au XXI^e siècle, ce qui en fait un paradigme politique primordial (Komiyama et Takeuchi, 2006; Spangenberg, 2011). Au fil du temps, le rôle des innovations radicales et systémiques a été au premier plan de la réalisation des objectifs de développement durable (Boons et al., 2013).

L'étude de faisabilité «Région d'innovation de Fessenheim» s'inscrit dans la même logique d'innovations durables. L'étude se concentre sur le développement d'une région d'innovation pilote basée sur de nouvelles technologies innovantes afin d'atteindre la neutralité des émissions et la durabilité du système énergétique, et de promouvoir la valeur ajoutée locale et la création d'emplois. Sur la base d'un accord bilatéral, l'étude de faisabilité développera un modèle de référence pour le développement régional européen transfrontalier. L'étude propose des idées de projets pilotes, en particulier dans les domaines des « batteries vertes », de l' « hydrogène vert » et des « réseaux intelligents », et met en lumière les liens et les co-bénéfices de leur mise en œuvre potentielle (figure 1).

En utilisant une approche interdisciplinaire et orientée vers la pratique, l'étude de faisabilité vise à impliquer des partenaires et des parties prenantes issus des milieux scientifiques, économiques, politiques, de l'administration publique et de la société civile afin de faire progresser la défossilisation du système énergétique et, par conséquent, de l'économie de la région. Le projet utilise les compétences présentes dans le Cluster du Rhin supérieur pour la recherche sur la durabilité (URCforSR), telles que les instituts de recherche individuels, Eucor – le Campus européen, et TriRhenaTech, pour former une coalition globale. L'objectif principal et la force de l'étude consistent à réunir les vastes connaissances et compétences scientifiques de la vallée du Rhin supérieur avec les connaissances pratiques de l'industrie et des acteurs de la société. À la suite des études trinationales précédentes (RES-TMO, Smart Meter, SumoRhine) et des études du Projet de Territoire, quatre éléments importants ont été identifiés pour le développement de la région d'innovation:

1. La démonstration de nouveaux concepts technologiques liés à l'innovation en matière d'énergie durable par le biais de laboratoires vivants régionaux susceptibles de fournir à l'avenir des résultats tangibles aux citoyens.
2. La connexion entre l'expertise scientifique existante de la région et les investissements industriels par le biais des pôles de transformation et d'innovation.
3. Le développement de concepts d'intégration des domaines de la formation, de la formation continue et de l'enseignement pour continuer à dynamiser la région modèle.

4. L'initiation d'un discours avec les différentes communautés de la région sur la vision du projet et les pilotes d'innovation concrets ainsi que la prise en compte de leur contribution.

Ensemble, les éléments susmentionnés constituent les piliers du développement d'une région d'innovation transfrontalière et contribuent à l'idée principale de l'étude de faisabilité.

En intégrant des études pertinentes, des partenaires scientifiques et des parties prenantes de la société et de l'économie, l'idée principale de l'étude de faisabilité est d'identifier des champs de transformation viables pour la région d'innovation en prenant en compte dans l'équation la consommation régionale totale d'énergie primaire afin d'induire une transformation vers un marché industriel et énergétique orienté vers l'avenir. Plus précisément, la vision de l'étude est d'établir:

- Une région européenne d'innovation transfrontalière en connectant les acteurs régionaux du monde universitaire, de l'économie et de la société.
- Un modèle européen (Living Lab) comme exemple pour une transformation sociétale et industrielle vers la durabilité.

Dans cette optique, après avoir analysé les atouts régionaux du Rhin supérieur et de la région d'innovation de Fessenheim, des champs de développement répondant aux exigences des demandes politiques mises en avant dans le Projet de Territoire ont été identifiés. Les objectifs politiques décrits dans le Projet de Territoire s'inscrivent dans les objectifs européens, nationaux et régionaux visant à atteindre la durabilité et la neutralité climatique.

Parallèlement aux objectifs de transformation vers la durabilité et la neutralité climatique, le Projet de Territoire a postulé que la création de pôles d'innovation technologique dans la région conduit à:

- Un emploi orienté vers l'avenir
- Des industries de l'innovation
- Une éducation et formation transfrontalières
- La participation des citoyens

En reliant les objectifs postulés du Projet de Territoire et les atouts régionaux du Rhin supérieur et de la région d'innovation de Fessenheim, les idées pour le développement de pilotes comme exemples de bonnes pratiques sont basées sur quatre groupes de compétences. Trois groupes de compétences sont classés dans la catégorie des pôles d'innovation technologique:

1. Pôle d'innovation pour les batteries vertes et l'économie circulaire des batteries
2. Pôle d'innovation pour l'hydrogène vert
3. Pôle d'innovation pour les réseaux intelligents

En outre, le quatrième groupe de compétences, «cadre territorial», étudie les conditions environnementales, sociales, réglementaires et économiques générales pour la mise en œuvre des trois groupes de compétences des pôles d'innovation technologique (figure 1).

Concept de neutralité carbone pour l'énergie et le transport

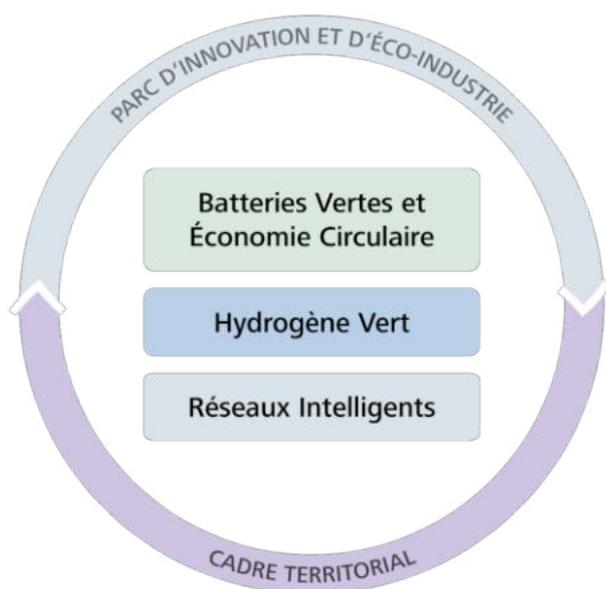


Figure 1. Champs d'innovation pour le développement d'exemples de bonnes pratiques intégrés dans les conditions territoriales générales et situés dans des parcs d'innovation et d'éco-industrie

Une autre idée-clé est que les pôles d'innovation technologique sélectionnés soient interdépendants, corrélés. Ils doivent être exécutés simultanément pour une transformation régionale réussie et durable. En effet, le lien entre les batteries et l'hydrogène vert est d'une grande importance pour la transformation régionale globale car ils sont complémentaires en termes de mise en œuvre d'un système de stockage pour les énergies renouvelables volatiles, de stabilisation du réseau et de contribution aux processus et applications du transport et de l'industrie. La temporalité et les différents moyens de transport apportent une sécurité et une flexibilité complémentaires dans le système énergétique (Specht et al., 2004). Par exemple, en termes d'applications industrielles, les batteries possèdent une grande flexibilité en termes de sources d'approvisionnement énergétique mais ne sont pas adaptées aux processus à forte intensité énergétique, tandis que l'hydrogène vert est particulièrement efficace et économe en énergie dans les processus industriels à forte intensité énergétique. D'autre part, en termes de transport, les batteries pourraient être utilisées pour le transport de passagers, tandis que l'hydrogène vert pourrait être plus performant que les batteries pour le transport lourd par bateau et par train. En outre, l'adaptation du réseau aux énergies renouvelables est nécessaire pour augmenter l'énergie fournie par ces dernières et peut être soutenue par les applications innovantes décrites dans les pôles d'innovation sur les batteries et l'hydrogène vert, car elles peuvent toutes deux contribuer à un approvisionnement en électricité suffisant et en temps voulu.

En gardant à l'esprit ce qui précède, les chapitres suivants développent les atouts locaux de la région de Fessenheim et donnent un aperçu des thèmes, des recherches et des recommandations de chacun des groupes de compétences afin de plaider en faveur de la mise en œuvre à grande échelle des projets pilotes complémentaires proposés.

02. Atouts régionaux et locaux pour la région d'innovation de Fessenheim

Comme mentionné dans l'introduction, les thèmes des groupes de compétences sont basés sur les objectifs politiques et les atouts régionaux de la région d'innovation de Fessenheim. Ce chapitre donne un aperçu de ces atouts régionaux.

La région innovante de Fessenheim est située dans la région du Rhin supérieur, une région géographiquement diversifiée située à la frontière triangulaire entre la France, la Suisse et l'Allemagne. Le Rhin est la principale voie de communication de la région et constitue sa frontière naturelle. La région est caractérisée par la vallée du Rhin qui est entourée par les régions montagneuses des Vosges à l'ouest et de la Forêt-Noire à l'est. Les contreforts du Jura en Suisse se trouvent à la limite sud. La région métropolitaine trinationale est habitée par plus de six millions de personnes (Jung et al., 2012) et affiche une forte performance économique (PIF 272 milliards/an) (Regierungspräsidium Freiburg, n.d.). La région de Fessenheim est directement reliée à une infrastructure de transport bien connectée comprenant trois corridors de transport européens, les gazoducs européens bien construits et le réseau électrique européen à haute tension (DG Mobilité et Transports de la CE, n.d.).

La région du Rhin supérieur est apte à devenir le pôle d'innovation dans les domaines mentionnés ci-dessus pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, la région présente un potentiel économique élevé qui se manifeste par un PIB de 272 milliards d'euros par an, soit plus que celui de la Finlande et de l'Irlande réunies (Regierungspräsidium Freiburg, n.d.). En outre, l'infrastructure industrielle existante dans la région favorise le développement des petites et moyennes entreprises (Interreg Rhin supérieur, 2019). Par conséquent, étant donné que les activités industrielles transfrontalières sont fortement développées, les projets transfrontaliers d'investissement conjoint peuvent apporter une grande valeur ajoutée. Une étude européenne a en effet estimé que le potentiel de relance dans les régions frontalières peut atteindre une croissance de 485 milliards d'euros s'il est accompagné d'une réduction importante des barrières juridiques et administratives (Commission européenne, 2017) qui sont responsables d'une perte de 3% du PIB européen (Commission européenne, 2017). À juste titre, la présente étude de faisabilité se concentre sur les pôles d'innovation sans obstacles. En 2018, la région du Rhin supérieur comptait environ 3,2 millions d'emplois. 97 000 travailleurs faisaient la navette avec les pays voisins, dont 61% en Alsace et 38% à Baden Baden. Le nombre de travailleurs transfrontaliers a augmenté de 12% par rapport à 2008 (Conférence du Rhin supérieur, 2020).

Selon l'étude sur les régions transfrontalières du rapport 2017 de la Commission européenne (CE), le nombre d'employés peut être stimulé par des investissements

communs. En effet, seulement 2% des citoyens de l'Union européenne (UE) traversent les frontières nationales au sein de l'UE, mais 66% des citoyens le long des régions frontalières traversent régulièrement les frontières nationales au sein de leur région (Commission européenne, 2017). Le potentiel de développement de nouveaux lieux de travail dans les régions transfrontalières européennes a été estimé à huit millions par le rapport de la Commission européenne publié en 2017. Par conséquent, les régions frontalières sont importantes pour une intégration européenne complémentaire et horizontale.

Les atouts de la région du Rhin supérieur, qui peuvent contribuer à la transformation et à la croissance durables de la région et à la valeur ajoutée pour la société et l'économie, sont les suivants:

Premièrement: Les industries chimiques et pharmaceutiques sont très importantes en termes de génération d'emplois et de création de valeur. Toutefois, pour rester compétitif au niveau mondial, il est impératif de transformer cette industrie régionale en une industrie plus efficace sur le plan énergétique et produisant moins d'émissions de CO₂. À cette fin, le transfert de technologies innovantes vers les entreprises doit être accru sur la base d'exemples de bonnes pratiques.

Deuxièmement: Le Rhin supérieur ne doit pas passer à côté d'investissements prometteurs dans le secteur des transports, dans le secteur énergétique ou dans la création d'une économie circulaire. Par exemple, en ce qui concerne le secteur des transports, la région a un grand volume de trafic et de commerce. Par conséquent, les réductions d'émissions dans le secteur des transports pourraient avoir un grand impact et aider à atteindre la neutralité climatique. En outre, la région du Rhin supérieur entretient des liens étroits avec l'industrie automobile ainsi qu'avec les technologies et les innovations pertinentes qui soutiennent la transformation du secteur des transports (y compris les composants de la construction automobile) vers la neutralité climatique. Il est également très important de suivre les dernières tendances en matière de neutralité climatique pour créer localement des lieux de travail tournés vers l'avenir.

Troisièmement: La région du Rhin supérieur occupe une position centrale en Europe et possède de nombreuses connexions et routes fiables qui permettent un transport multimodal et efficace des marchandises. L'infrastructure régionale de transport comprend: les corridors de transport existants Rhin-Alpes, Atlantique et Rhin-Danube qui relient les principaux ports maritimes européens Rotterdam - Gênes - Marseille (route maritime du Rhône) et les ports du Danube situés plus bas vers la mer Noire. En outre, d'importantes infrastructures ferroviaires et autoroutières existent le long des corridors de transport et

servent également de lien entre les routes maritimes. Les liaisons de transport les plus importantes dans le Rhin supérieur sont les liaisons nord-sud, qui offrent d'excellentes conditions pour le chargement et le déchargement des ports, ainsi que pour l'administration portuaire (Hafenverwaltung Kehl, 2015). En outre, d'importants gazoducs et lignes électriques européens se trouvent dans la région. Ces installations sont déjà prêtes à l'emploi et peuvent, si nécessaire, être adaptées pour transporter à l'avenir de l'électricité verte ou de l'hydrogène vert du nord au sud ou vers le réseau européen à haute tension dans d'autres directions.

Quatrièmement: Dans la région, il existe une forte concentration d'institutions de recherche et d'éducation, notamment des instituts mondialement reconnus dans les domaines de l'énergie, de la technologie et de la durabilité, des universités et des entreprises privées, ce qui offre une excellente occasion de créer un réseau solide pour l'innovation. Grâce à cette forte concentration, un grand nombre de jeunes gens présentant un bon niveau d'éducation et possédant les compétences requises à tous les niveaux de formation arrivent en permanence sur le marché du travail. La région du Rhin supérieur dispose donc de vastes ressources humaines pour une transformation technologique durable. En outre, les liaisons rapides entre l'Autriche (tous les jours), la France (tous les jours), la Suisse (tous les jours), l'Espagne (toutes les semaines), le Luxembourg (toutes les

semaines), la Belgique (toutes les semaines), les Pays-Bas (toutes les semaines) et l'Italie (toutes les semaines) sont attractives pour les jeunes Européens qui souhaitent travailler à temps partiel ou plus dans la région du Rhin supérieur.

Cinquièmement: Le traité d'Aix-la-Chapelle comprend des clauses expérimentales, qui peuvent être utilisées pour démontrer comment une intégration transfrontalière réussie (CBRIS) contribue à la valeur ajoutée d'une industrie d'innovation commune.

Outre les atouts régionaux évoqués précédemment, les atouts locaux de Fessenheim et de ses environs, tels que la disponibilité de ports, d'infrastructures de circulation, d'industries et de leurs usines, indiquent le potentiel élevé de la région à devenir un modèle européen de transformation régionale vers la durabilité.

Cependant, le succès de la mise en œuvre des pilotes recommandés dans les différents domaines d'innovation repose sur deux pierres angulaires: la viabilité d'un dossier commercial pour les premiers acteurs privés et la visibilité, le soutien et l'acceptation du public. Si toutes ces conditions sont remplies et le soutien politique est assuré, la mise en œuvre des pilotes recommandés pour une région économique durable et neutre en CO₂ sera rendue possible.

03. Potentiels en matière d'énergies renouvelables dans la région du Rhin supérieur

Au fil du temps, les ressources énergétiques renouvelables sont devenues des contributeurs importants à l'approvisionnement total en énergie primaire à l'échelle mondiale (Gernaat et al., 2021). La disponibilité des énergies renouvelables devient de plus en plus une condition préalable à la réussite de la transformation par les investissements. Le succès de la mise en œuvre du projet pilote est donc directement lié à la disponibilité de l'énergie verte. C'est pourquoi le rapport comprend un chapitre qui évalue le potentiel technique des énergies renouvelables dans la région du Rhin supérieur.

Sur son site Internet, le Parlement européen définit les sources d'énergies renouvelables comme suit: énergie éolienne, énergie solaire, énergie hydroélectrique, énergie des océans, énergie géothermique, biomasse et biocarburants. En juillet 2021, la Commission européenne a proposé d'augmenter la proportion d'énergies renouvelables dans le mix énergétique de l'UE dans le cadre des objectifs contraignants de la directive sur les énergies renouvelables et de la promotion des carburants renouvelables tels que l'hydrogène (EUROPA - Commission européenne, 2021).

Dans une étude réalisée dans le cadre du projet Interreg Rhin supérieur, « RES-TMO », le potentiel technique de production d'énergie renouvelable dans la région du Rhin supérieur a été examiné et les principaux résultats sont inclus ici en raison de leur importance remarquable pour l'ensemble du processus de transformation.

En ce qui concerne l'estimation du potentiel des énergies renouvelables, il est important de commencer par définir ce que l'on entend par énergies renouvelables (telles que définies ci-dessus) et par potentiels. La hiérarchie des potentiels peut être observée dans la figure ci-dessous en reprenant les définitions de Jäger et al. (2016). Les potentiels comprennent: les potentiels théorique, géographique, technique, économique et réalisable. Les enquêtes dans le cadre du projet RES-TMO s'arrêtent au niveau du potentiel technique car les derniers niveaux (économique et réalisable) doivent être calculés au cas par cas. Le potentiel technique prend en compte l'utilisation des terres, le système et les contraintes topographiques ainsi que les contraintes technologiques des technologies d'énergie renouvelable (Hafenverwaltung Kehl, 2015).



Figure 2: La hiérarchie des potentiels telle que définie par Jäger et al. (2016) et adaptée dans le cadre du projet RES-TMO.

Principales conclusions

L'éolien: Les résultats indiquent que le potentiel technique de production d'énergie éolienne dans la région du Rhin supérieur est de 128 TWh par an. Au niveau national, le potentiel technique éolien est relativement plus élevé en France et en Allemagne qu'en Suisse. La demande énergétique annuelle totale dans la région du Rhin supérieur a été estimée à environ 212.41 TWh par an, et la moitié de cette demande pourrait théoriquement être satisfaite par l'énergie éolienne. Cependant, les conditions économiques et réglementaires, ainsi que l'acceptation sociale de la technologie, limitent et réduisent le potentiel technique de l'énergie éolienne dans la région et il n'est pas réaliste d'espérer plus de 10% du potentiel technique.

L'énergie solaire photovoltaïque: La deuxième source d'énergie renouvelable importante dans la région est le solaire photovoltaïque (PV). Dans l'étude RES-TMO, le potentiel solaire PV dans le Rhin supérieur a été divisé en deux catégories: le PV sur toiture et le PV en plein air. Le PV en champ libre a été à nouveau divisé en deux sous-catégories qui dépendent de l'utilisation du sol: le PV au sol (GM) et le PV agricole (Agri).

1. PV sur les toits: Le projet RES-TMO a estimé que le potentiel technique du PV sur les toits est de 52 TWh par an, ce qui peut théoriquement couvrir environ 24% de la demande énergétique totale. Cependant, le potentiel technique total est limité par des restric-

tions, telles que la capacité de charge des toits, les effets d'ombre et les monuments protégés, ainsi que la volonté des citoyens d'investir dans les installations. L'acceptation sociale de cette source d'énergie renouvelable est relativement élevée (Cousse, 2021). Ce serait un succès si 40 à 50% des toits pouvaient être couverts de panneaux solaires à long terme ; toutefois, cela n'est réalisable que si toutes les conditions sont réunies.

2. PV en champ libre: Le potentiel technique du PV en champ libre est divisé en deux sous-catégories: Agri-PV et GM-PV. La différence entre les deux vient essentiellement du fait que l'Agri-PV tient compte de la double utilisation des terres arables pour la production d'énergie et de nourriture. Le potentiel technique estimé pour le PV en plein air (159.5 TWh par an) est important, mais seul un petit pourcentage de la surface utile calculée peut être couvert par des installations PV, en raison d'aspects environnementaux et sociétaux qui n'ont pas encore été pris en compte. En ce qui concerne la hiérarchie des potentiels, les potentiels économique et réalisable seront plus limités que le potentiel technique. Finalement, si 50% du potentiel technique de l'énergie solaire est utilisé sous forme de PV en champ libre, une contribution significative de près de 80 TWh par an aux besoins énergétiques totaux de la région du Rhin supérieur est possible.

L'hydroélectricité: L'hydroélectricité est une autre source d'énergie renouvelable étudiée par le projet RES-TMO. Le projet a conclu que la contribution de l'hydroélectricité de 13.6 TWh par an est limitée car les ressources hydroélectriques de la région sont déjà largement utilisées et presque épuisées, comme l'ont confirmé les autorités des deux côtés du Rhin.

La biomasse: La biomasse est de plus en plus utilisée aujourd'hui pour remplacer les combustibles fossiles dans les secteurs du transport et de l'énergie. Elle présente l'avantage, par rapport aux combustibles fossiles, d'être disponible au niveau régional en Europe et de pouvoir être stockée. Ce dernier point est un avantage par rapport aux sources d'énergies renouvelables intermittentes comme le vent et le soleil. Le projet RES-TMO a basé son estimation sur le projet «Biomass Oui» (Schumacher et al. (Eds.), 2017), qui a étudié en profondeur le potentiel de la biomasse dans la même région. Ce dernier, estimé à 5.2 TWh par an, est plutôt limité.

La géothermie: L'énergie géothermique est un autre type d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie géothermique peuvent être différenciées entre les technologies utilisant le sous-sol peu profond (10 à 100 mètres de profondeur) et les méthodes exploitant le sous-sol profond (plusieurs milliers de mètres de profondeur) pour

Tableau 2a: Estimation de la consommation d'énergie dans la région du Rhin supérieur

Région du Rhin Supérieur (RRS)	Population en 2019*	Demande Énergétique Finale 2016 en MWh/habitant**	Demande Énergétique dans RRS en MWh/an***	Demande Énergétique dans RRS en TWh/an***
Suisse	1.507.718	49	73.878.182	73,88
Allemagne	2.858.606	26	74.323.756	74,32
France	1.888.480	34	64.208.320	64,21
Total	6.254.804		212.410.258	212,41

Tableau 2b: Estimation du potentiel technique des énergies renouvelables dans la région du Rhin supérieur

Source EnR	Potentiel Annuel (en TWh/an)
Éolien	128,0
Solaire PV Toit	52,2
Solaire PV Agri	91,5
Solaire PV Sol	68,0
Biomasse	5,2
Hydroélectrique	13,6

l'extraction d'énergie. L'énergie géothermique peu profonde est généralement utilisée pour fournir de l'énergie de chauffage ou de refroidissement, tandis que l'énergie géothermique profonde peut être employée à la fois pour la production d'électricité et le chauffage des locaux (Miocic, 2021). L'étude menée dans la Région Métropolitaine Trinationale du Rhin Supérieur (RMT), suggère que, bien qu'il y ait déjà plusieurs pompes à chaleur géothermiques (GSHP) installées dans la RMT, il y a encore de la marge pour que de nombreuses maisons individuelles de la région soient chauffées et refroidies avec des GSHP, en particulier lorsqu'elles sont combinées avec une rénovation basse consommation d'avenir. Ainsi, l'augmentation de la part des GSHP utilisées dans la RMT peut permettre une réduction drastique des émissions de carbone liées au chauffage et au refroidissement des locaux (Miocic, 2021). L'efficacité des puits géothermiques profonds dépend de la profondeur à laquelle les fluides chauds sont rencontrés ainsi que des propriétés des roches d'où proviennent les fluides. Sur le plan géologique, la RMT présente une forte densité de flux thermique qui conduit à des températures élevées dans le sous-sol relativement peu profond, et représente donc une région idéale pour l'exploitation géothermique profonde (Harlé et al., 2019). Cependant, les préoccupations sociétales concernant les risques sismiques doivent être sérieusement prises en considération, transformant les potentiels techniques en potentiels de faisabilité.

Conclusions

En conclusion, le potentiel technique des sources d'énergies renouvelables dans la région du Rhin supérieur s'élève à 358,5 TWh par an. Théoriquement, la totalité de la demande énergétique annuelle du Rhin supérieur pourrait être couverte sans même prendre en compte le potentiel géothermique.

Le potentiel technique est limité dans une large mesure par des facteurs tels que la concurrence en matière d'utilisation des terres pour la production alimentaire, les impacts environnementaux, les aspects paysagers, l'acceptation sociétale, les conditions économiques générales, les réglementations et autres. Au cas par cas, une estimation plus réaliste du potentiel, comme le potentiel économique et le potentiel réalisable, peut être calculée comme mentionné précédemment. Néanmoins, le potentiel technique soutient le développement de meilleures conditions cadres et d'espaces libres pour exploiter efficacement les potentiels par le biais d'une approche intégrative avec une forte participation des citoyens et des entreprises.

Sur la base de cette connaissance des potentiels des énergies renouvelables dans la région du Rhin supérieur, les idées pilotes ont été développées dans les domaines définis pour les pôles d'innovation. Leurs résultats sont présentés dans les chapitres suivants.

04. Batteries vertes et économie circulaire

Les installations pilotes nécessaires à l'établissement d'une économie circulaire des matériaux pour les batteries lithium-ion sont présentées ci-dessous. Les interconnexions (figure 4) entre ces usines pilotes, ainsi que les connexions avec les usines pilotes proposées par les autres groupes de compétences, y sont mises en évidence. En outre, les avantages spécifiques qui soutiennent les usines pilotes respectives de la région de Fessenheim sont discutés.

Les batteries lithium-ion jouent un rôle crucial dans la mise en place d'un secteur énergétique durable et neutre en carbone. Puisque la batterie lithium-ion est actuellement le type le plus développé de technologie de batterie avancée disponible, elle est largement utilisée notamment dans les véhicules électriques (VE). Si l'on considère le pronostic futur des batteries obsolètes présenté dans la figure 3, on

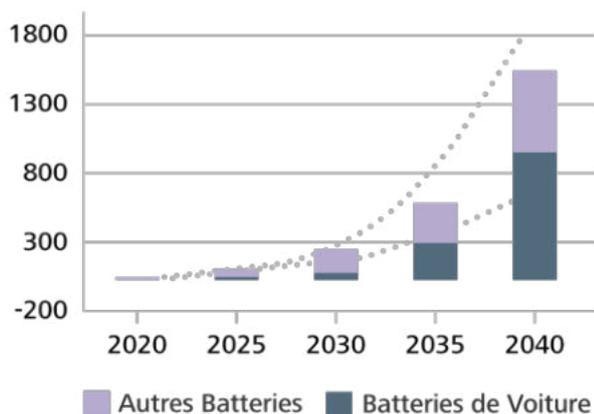


Figure 3: Pronostic du flux de recyclage de LIB en kt (élevé et faible) jusqu'en 2040 (Adapté de Neef et al., 2021)

peut noter que la mise en œuvre d'une économie¹ circulaire pour les batteries lithium-ion devrait être prioritaire en ce qui concerne les éventuelles usines pilotes dans la région de Fessenheim.

La figure 4 présente le cycle de vie d'une batterie et se concentre sur les domaines importants pour l'économie circulaire prévue mise en œuvre par les usines pilotes et décrite plus loin.

Pour mettre en place une économie circulaire telle que présentée dans la figure 4, le groupe de compétence Batteries Vertes suggère de se concentrer sur les domaines suivants à Fessenheim et dans la vallée du Rhin supérieur:

- Production de matériaux de batterie à haute performance et à faible empreinte environnementale, en utilisant des matériaux neufs et réutilisés.
- Qualification des batteries usagées de véhicules électriques en vue d'une éventuelle utilisation en seconde vie.
- Installation d'un stockage d'énergie électrique avec l'intégration de batteries de véhicules électriques de seconde vie.
- Développement d'une usine innovante de démantèlement et de recyclage des batteries en fin de vie.

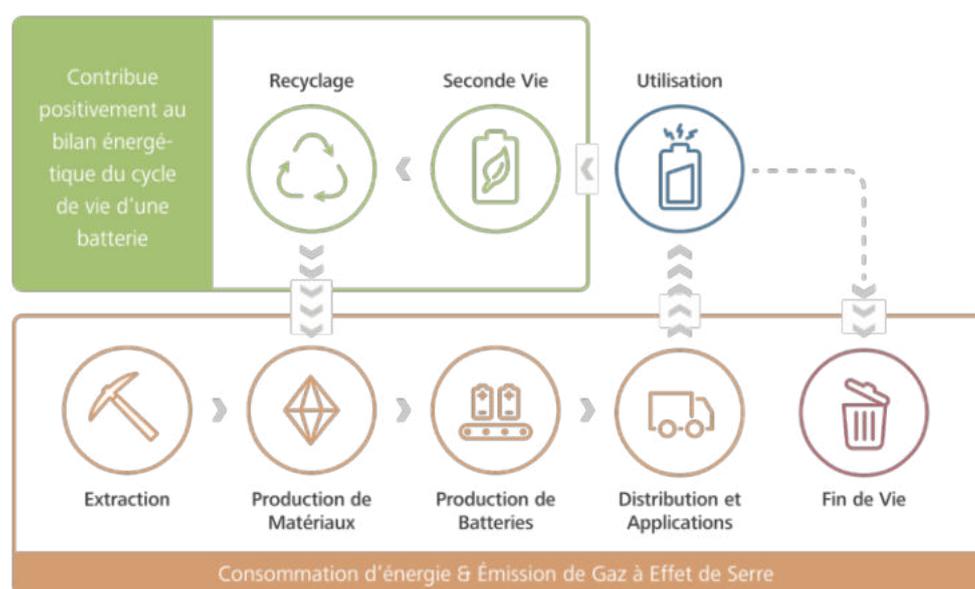


Figure 4: Cycle de vie d'une batterie (Dühnen et al., 2020).

¹L'économie circulaire (EC) est une approche régénératrice visant à réduire les déchets et à garantir l'éco-durabilité des produits après leur utilisation (Mossali et al., 2020).

Sur la base des points susmentionnés, trois pilotes principaux ont été identifiés :

- **Pilote 1 :** Infrastructure pour l'utilisation en seconde vie des batteries de VE comprenant deux installations pilotes – un centre de qualification pour les systèmes de batteries de VE de seconde vie et un système hybride de stockage d'énergie électrique à l'échelle du service public, complété par des batteries de VE de seconde vie.
- **Pilote 2 :** Infrastructure pour le démantèlement et le recyclage des batteries comprenant deux installations pilotes – une installation pour le démantèlement des batteries, y compris les diagnostics, et une installation pour le recyclage des matériaux des batteries.
- **Pilote 3 :** Une usine de matériaux de batterie haute performance.

Il est important de noter que seule une approche globale de toutes les installations pilotes (voir les recommandations ci-dessous) permet d'obtenir les synergies souhaitées ainsi que des avantages économiques et environnementaux importants. Les installations proposées se complètent et offrent des opportunités commerciales significatives. C'est pourquoi le fait de ne pas mettre en œuvre toutes les installations proposées à proximité immédiate entraîne une réduction des avantages pour la région et nuit à sa compétitivité dans l'économie circulaire des batteries.

Les installations pilotes intégrées proposées présentent de nombreuses interconnexions, principalement liées à l'échange de matériaux et de savoir-faire technologique. En outre, toutes ces installations profiteraient fortement de l'infrastructure de transport existante dans la région, en particulier des ports le long du Rhin, qui offrent un grand avantage pour le transport économique et à grande échelle de minerais ou de batteries usagées. Les installations proposées par le sous-groupe «recyclage» et le sous-groupe «matériaux pour batteries» ont une forte demande énergétique qui doit être satisfaite par des sources d'énergies renouvelables dont le potentiel important a été évalué par le projet RES-TMO et discuté dans la section 3. En outre, les usines pilotes proposées bénéficieront des instituts de recherche et des universités de la région de Fessenheim, qui peuvent fournir l'expertise requise en matière de matériaux pour batteries. Les conditions précédentes font de la région un cadre idéal pour des collaborations avec des entreprises désireuses d'investir dans de telles installations. Enfin, il existe des liens avec les installations pilotes proposées par les groupes de compétences Batteries Vertes et Réseaux Intelligents et abordées dans les sections suivantes. Un exemple est le sous-produit de l'oxygène, rarement utilisé mais toujours présent, obtenu par la synthèse de l'hydrogène, qui est un réactif néces-

saire pour la fabrication des matériaux de batterie. Un autre exemple est le système électrique hybride envisagé par le sous-groupe « 2nd life », qui pourrait être intégré dans un réseau intelligent.

La région de Fessenheim offre des conditions favorables à l'installation de projets pilotes. Par ailleurs, les emplois sûrs générés par les installations prévues profitent mutuellement à la région de Fessenheim. Il n'y a pas d'alternative à l'économie circulaire en ce qui concerne les technologies de batteries (principalement les LIB), car le marché des batteries est en plein essor, ce qui entraînera à l'avenir une masse de batteries obsolètes. Les défis environnementaux, sociétaux et économiques exigent une plus grande infrastructure de recyclage des batteries et offrent une moindre dépendance aux matières premières hors d'Europe ainsi que des opportunités de croissance pour l'économie de la région. La figure 3 montre le développement attendu du flux de recyclage des LIB, or une capacité adéquate pour la seconde utilisation et le recyclage des batteries n'a pas encore été planifiée.

Recommandations

Afin d'établir une économie circulaire des batteries, il est crucial de localiser la chaîne de traitement complète dans la région. Par conséquent, il est recommandé d'établir un centre de qualification pour les systèmes de batteries de véhicules électriques de seconde vie et de le relier à un système de stockage d'énergie électrique hybride à l'échelle du service public complété par des batteries de seconde vie (pilote 1), tout en tenant compte de la logistique de collecte des batteries usagées et de distribution des packs de batteries de seconde vie aux utilisateurs industriels. L'idée pilote susmentionnée a déjà atteint un haut niveau de maturité technologique et le modèle économique est clair. Ce pilote devrait pouvoir être mis en place dans un avenir proche et il pourrait être possible d'utiliser des bâtiments industriels existants pour mettre en œuvre le centre de qualification.

En ce qui concerne le pilote 2, il est recommandé d'établir une infrastructure pilote servant de banc d'essai pour de futures installations industrielles axées sur le démantèlement et le recyclage des batteries. Le démantèlement est un processus étroitement lié à la qualification des batteries (pilote 1) et doit être effectué de manière automatisée (à l'aide de robots). Après le démantèlement, la première étape du processus de recyclage des batteries est basée sur un processus de broyage mécanique (déchiquetage mécanique des cellules de batteries). Ce processus de broyage permet d'obtenir ce que l'on appelle la masse noire, qui est utilisée pour l'extraction des éléments de valeur (principalement le cobalt et le nickel). À l'issue du processus de recyclage, ces éléments sont obtenus sous

une forme qui permet de les utiliser comme matières premières pour la production de nouveaux matériaux de batterie (pilote 3). L'ensemble du processus de recyclage doit inclure des unités de diagnostic qui sont importantes pour la réutilisation des matériaux recyclés comme matières premières. Bien que des éléments bruts précieux et critiques pour la réutilisation puissent être obtenus à partir du recyclage des batteries lithium-ion, de nombreux défis liés aux nouvelles innovations doivent encore être relevés. En effet, le groupe consultatif sur les batteries de l'Agence californienne de protection de l'environnement (CalEPA, 2021) a recommandé la mise en place de projets de démonstration tels que ceux suggérés dans le pilote 2 pour le recyclage des batteries lithium-ion afin d'améliorer nos connaissances sur les performances (c'est-à-dire la durée de vie, le taux de dégradation) et la sécurité des processus de recyclage. Ces bancs d'essai sont nécessaires de toute urgence pour accroître la confiance du public, garantir la meilleure utilisation des matériaux et tester leur faisabilité économique. Il est également recommandé d'établir les deux infrastructures pilotes en même temps, afin de tester l'ensemble du processus de recyclage à proximité immédiate.

Le recyclage des batteries est étroitement lié à l'idée d'une usine de matériaux pour batteries (pilote 3) ; il est donc recommandé de mettre en place une infrastructure pour le développement et la production de nouveaux matériaux

pour batteries à partir de matières premières recyclées seules ou associées à de nouvelles matières premières. L'innovation consistant à intégrer les matières premières recyclées des anciennes batteries dans la production de nouveaux matériaux de batterie est une tâche futuriste en cours et nécessite une coopération étroite entre la science et l'industrie.

Nous recommandons que ces usines pilotes complémentaires soient mises en œuvre en tant qu'entité afin d'optimiser les bénéfices des synergies qui en résultent, principalement l'échange de matériaux (réduction du transport) et de savoir-faire (nouvelles innovations) (figure 5).

La construction de ces installations nécessite des investissements conséquents. Il est essentiel de convaincre les industriels que le recours combiné à des financements transfrontaliers (contexte local) et européens (dans le cadre du Pacte Vert) est une opportunité d'obtenir des fonds plus importants pour mieux surmonter les besoins en investissement. Par ailleurs, il est vivement conseillé d'installer les usines pilotes dans la zone de l'euro district Breisach - Biesheim - Fessenheim. Son infrastructure portuaire est en effet compatible avec une plateforme logistique trimodale. Enfin, cette zone est propice à l'installation des infrastructures correspondantes puisqu'elle compte un grand nombre de sites potentiels sans compter que l'énergie renouvelable peut y être récoltée de part et d'autre de la frontière.

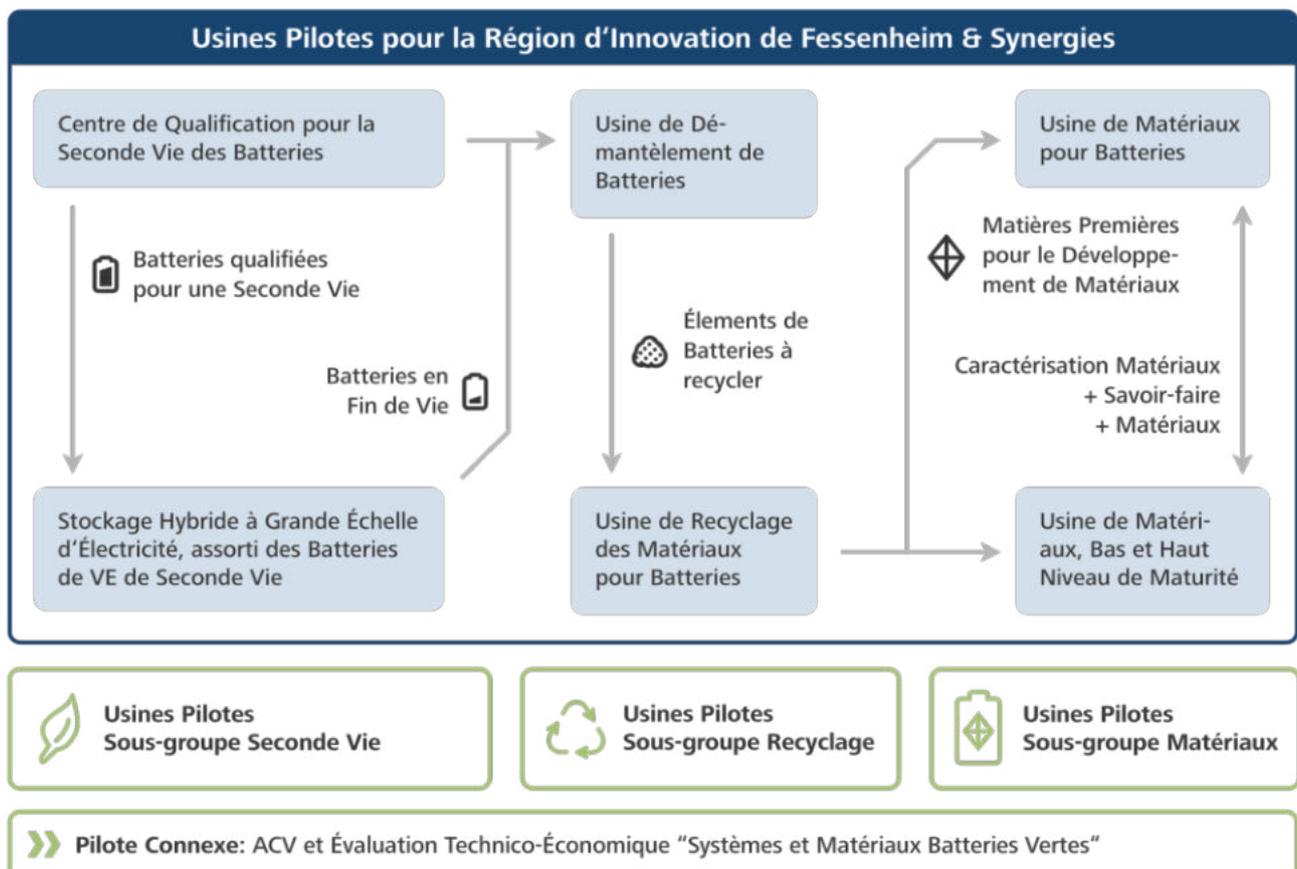


Figure 5: Représentation schématique du pilote principal suggéré par le groupe de compétence sur les batteries

05. Centre multimodal de l'hydrogène à Fessenheim

La mise en œuvre de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique offre des possibilités uniques pour une intégration plus large des énergies renouvelables et une utilisation optimisée des ressources, ainsi que pour la création d'emplois d'avenir. Sa mise en œuvre garantit en définitive le développement de la région en une région économique durable et tournée vers l'avenir, neutre en termes de CO₂. L'hydrogène permet le stockage saisonnier de l'électricité renouvelable et aide à construire un système énergétique plus robuste en couplant les différents secteurs de manière flexible et efficace (Samsati & Samsati, 2019). En outre, plusieurs grandes entreprises qui utilisent l'hydrogène dans leurs processus sont situées dans la région autour de Chalampé et dans la région de Bâle. Un autre point-clé est le fait que la région regorge d'éléments, de projets et d'acteurs régionaux qui peuvent collectivement former le centre multimodal de l'hydrogène et couvrir toute la chaîne de valeur, de la production à l'utilisation en passant par la distribution.

Ces conditions de soutien ainsi que la diversité et la complémentarité de la région ont été révélées par le « South Rhine H2 Summit » qui a été organisé en novembre 2021 à Biesheim (Haut-Rhin) par la Collectivité européenne d'Alsace. Les résultats de l'étude montrent que la demande de l'industrie en hydrogène vert est considérablement plus élevée que dans les autres secteurs. En outre, l'hydrogène actuellement produit de manière conventionnelle peut être (relativement) facilement remplacé par de l'hydrogène vert.

Il est donc suggéré que la construction du centre multimodal de l'hydrogène (figure 6) commence par la mise en place de capacités d'électrolyse à grande échelle. L'électricité verte disponible localement à grande échelle réduira les coûts de la production d'hydrogène vert. Cette étape initiale permettra également de montrer les avantages de l'utilisation des centrales hydroélectriques en service dans la région avec le solaire photovoltaïque, car les centrales hydroélectriques peuvent être utilisées la nuit et les jours sans soleil pour la production d'électricité.

En outre, les capacités d'importation d'hydrogène vert supplémentaire via le Rhin seront développées ultérieurement. La robustesse de l'infrastructure d'approvisionnement et la disponibilité de l'hydrogène liquide feront du centre multimodal une base commerciale pour l'énergie verte, en particulier lorsqu'elle s'accompagnera de l'extension du transport par conteneurs à un plan de transport multimodal et de la combinaison de l'infrastructure de transport disponible dans la région via l'eau, les routes et le rail. Dans ce cas, un terrain fertile est créé pour des applications plus distribuées de l'hydrogène vert dans la région, comme l'établissement d'une flotte de camions à hydrogène vert pour le transport lourd ou la décarbonisation des transports publics avec des bus et des trains à hydrogène. De même, la production et l'utilisation de plus en plus réparties de l'hydrogène vert et la promotion des « prosommateurs » d'hydrogène dans le secteur agricole exploiteront un autre atout régional en rapprochant les technologies de l'hydrogène du grand public et en les ancrant dans la région.

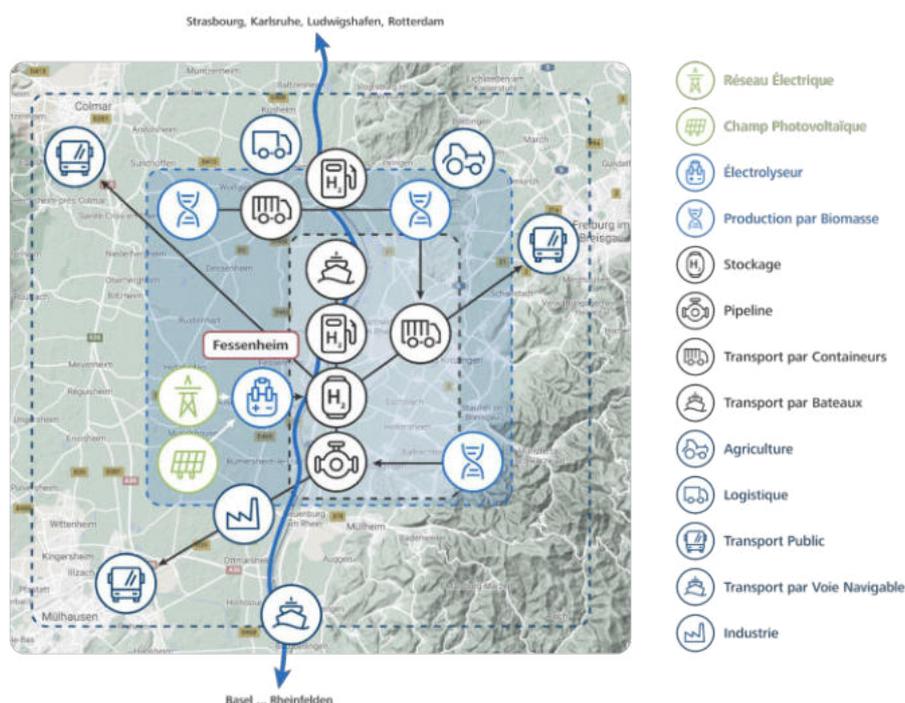


Figure 6: Principaux éléments du centre multimodal d'hydrogène dans la région de Fessenheim

l'hydrogène afin d'explorer les possibilités de production et d'application de l'hydrogène vert spécifiques à la région. Le centre multimodal de l'hydrogène reposera donc sur les quatre projets pilotes complémentaires suivants, qui couvrent les principales caractéristiques d'un système énergétique à base d'hydrogène opérationnel:

- **Pilote 1:** H2-A «Approvisionnement de l'industrie à grande échelle en hydrogène vert»
- **Pilote 2:** H2-B «Pipeline virtuel»
- **Pilote 3:** H2-C «Transport lourd»
- **Pilote 4:** H2-D «Production et utilisation distribuées en agriculture»

Recommandations

Tout d'abord, avec le pilote initial 1 H2-A, nous recommandons l'installation et l'exploitation d'un système d'électrolyseur à grande échelle de 200 MW situé près d'Ottmarsheim et de la zone industrielle de Chalampé. Cet emplacement est proposé en raison de sa proximité avec la zone industrielle de Chalampé et le nœud routier tri-modal franco-allemand d'Ottmarsheim (port, chemin de fer et autoroute). Pour une installation initiale d'environ 30 MW, il est proposé d'utiliser une petite fraction de l'électricité produite par les centrales hydroélectriques d'Ottmarsheim et de Fessenheim (chacune fournissant 160 MW nominaux) et de la combiner avec un système solaire PV flottant installé dans les bassins d'eau de ces centrales. D'autres installations solaires photovoltaïques flottantes sont proposées ultérieurement sur plusieurs lacs de gravier artificiels des environs. Le système d'électrolyseur devrait être installé à proximité et connecté via le pipeline d'hydrogène existant à la zone industrielle de Chalampé. La co-localisation avec la centrale électrique d'Ottmarsheim est optimale car elle offrira le double avantage d'utiliser l'infrastructure de distribution d'hydrogène existante et de fournir rapidement de l'hydrogène vert à l'industrie connectée. À terme, une extension de l'infrastructure locale de distribution d'hydrogène avec un pipeline parallèle à haute pression devrait être envisagée afin d'augmenter la capacité du pipeline d'hydrogène existant et d'améliorer la qualité de l'approvisionnement en fournissant une pression allant jusqu'à 100 MPa, ce qui est utile pour plusieurs applications, en particulier le transport (lien vers les projets pilotes H2-B et H2-C). La pression élevée permet d'utiliser des sections de tuyaux plus petites et intrinsèquement sûres et de transformer le pipeline en un système de stockage intermédiaire.

Deuxièmement, un approvisionnement complémentaire en hydrogène vert par le biais d'une option d'importation flexible est recommandé avec le projet pilote H2-B. La

construction de longs pipelines de transfert est généralement très coûteuse ; en outre, ces pipelines sont des structures rigides et peu flexibles. C'est pourquoi le concept pilote d'un « pipeline virtuel » est mis en place. Le projet pilote H2-B propose le transport discontinu d'hydrogène par conteneurs via le Rhin. La solution des conteneurs permet d'éviter les pertes dues au transfert entre les conteneurs fixes et les conteneurs de transport et de passer sans transition de l'hydrogène gazeux à haute pression à l'hydrogène liquide (LH2) plus dense. Le transport par conteneurs pouvant être facilement étendu des voies de navigation à un schéma de transport multimodal par rail et route, il ouvrira la voie à des applications distribuées loin des sites de ravitaillement établis dans le port industriel d'Ottmarsheim et/ou les voies de navigation de Fessenheim et rendra la distribution d'hydrogène plus flexible, robuste et économique. En outre, la disponibilité de l'hydrogène cryogénique catalysera la recherche, le développement et la démonstration de solutions innovantes, comme l'utilisation de supraconducteurs refroidis par l'hydrogène pour des lignes de transfert d'énergie électrique et chimique hybride ou des systèmes de stockage. Grâce au pipeline virtuel établi sur le Rhin, la région de Fessenheim sera directement reliée à Rotterdam, qui est voué à devenir le site d'atterrissage d'Europe centrale pour le LH2 provenant d'outre-mer. En outre, l'importation via le pipeline virtuel compensera à peu de frais le déficit potentiel d'approvisionnement en hydrogène vert laissé par la production locale. Compte tenu de ces éléments et avec le développement des capacités d'importation et d'exportation, la région de Fessenheim pourra se coordonner avec les différents sites de demande régionaux industriels situés le long et au-delà du Rhin et devenir la base commerciale transfrontalière de l'énergie verte.

Troisièmement, l'importante infrastructure routière transnationale reliant le nord de la Suisse, le Grand-Est en France et le sud-ouest de l'Allemagne a conduit de nombreuses entreprises de transport à exploiter des succursales dans cette région. Pour réduire l'empreinte CO₂ considérable du transport routier régional, il est recommandé, dans le cadre du projet pilote H2-C, d'établir un service à la demande qui offre aux entreprises des capacités de transport vertes basées sur l'hydrogène. S'inspirant du modèle commercial de la société suisse Hyundai Hydrogen Mobility, une entreprise du secteur des services achètera et exploitera une flotte de camions à hydrogène (20 à 30 au départ) et construira et exploitera l'infrastructure de ravitaillement nécessaire. Le fait de concentrer cette activité liée à l'hydrogène dans une entreprise du secteur des services permettra, d'une part, de négocier les meilleures conditions possibles (fiscalité, prix de l'hydrogène, etc.) et, d'autre part, de proposer des offres économiquement intéressantes aux clients. En conséquence, une station de ravitaillement en LH2 à la pointe de la technologie (capacité de distribution quotidienne initiale de 1

t, puis de 5 t) sera construite dans la région d'Ottmarsheim. La station sera caractérisée par une conception modulaire et comprendra une section de recherche et de développement indépendante, exploitée commercialement. La section commerciale alimentera de manière fiable la flotte de camions et fournira une capacité suffisante pour les petites flottes de bus à hydrogène exploitées à Mulhouse et/ou Fribourg-en-Brisgau. La section de recherche offrira des interfaces et une infrastructure flexibles pour développer de nouveaux protocoles d'alimentation en carburant pour poids lourds et pour tester les composants critiques, tels que les échangeurs de chaleur et les dispositifs de mesure.

Quatrièmement, la mise en œuvre de l'agrivoltaïque (agri-PV) pour la production locale d'hydrogène vert est recommandée dans le cadre du projet pilote H2-D «Production et utilisation distribuées en agriculture». L'utilisation de l'agri-PV sur les terres agricoles crée des avantages directs pour les agriculteurs. Outre le revenu supplémentaire généré pour les agriculteurs, l'agri-PV permet de protéger les plantes contre l'exposition directe au soleil, mais aussi pendant les tempêtes et la grêle (Fraunhofer ISE, 2020). Outre l'utilisation de l'électricité produite par le solaire PV et l'hydroélectricité, il est recommandé de tester et de développer davantage l'utilisation de la biomasse pour la

production locale d'hydrogène sur quelques sites prototypes. Dans le contexte de la production d'hydrogène renouvelable, la valorisation de la biomasse est une approche prometteuse, en particulier lorsque des biodéchets agricoles non valorisés peuvent être utilisés. En outre, l'utilisation de l'hydrogène dans l'agriculture sera démontrée, principalement dans les machines agricoles équipées de moteurs à combustion flexibles à carburant converti et dans les unités de production combinée de chaleur et d'électricité utilisant des piles à combustible à haute température. Comme on peut le constater, l'hydrogène offre de nouvelles possibilités pour le modèle commercial des coopératives agricoles en tant que négociants en carburant.

Comme nous l'avons vu plus haut, les projets pilotes sont complémentaires les uns des autres, car ils concernent différents domaines de production et d'application. Ils font appel à différentes technologies qui sont suffisamment mûres pour être mises en œuvre de manière programmée, et laissent un potentiel suffisant pour de nouvelles recherches et innovations. Bien que les projets puissent, en principe, être mis en œuvre indépendamment les uns des autres, le système global bénéficiera grandement d'une mise en œuvre intégrale, ensemble et dans l'ordre suggéré.

06. Réseaux intelligents

Dans le monde entier, et dans l'espoir qu'ils deviennent la norme pour les futurs réseaux électriques, les réseaux intelligents sont développés car ils sont technologiquement avancés et équipés pour optimiser la production et la consommation d'électricité. Les avantages des réseaux intelligents sont nombreux: d'une part, ils peuvent intégrer les nouvelles technologies de l'information et de la communication telles que les objets connectés et, d'autre part, ils sont capables de transmettre des informations en temps réel sur l'utilisation et la consommation d'électricité aux opérateurs du réseau (producteurs, distributeurs et consommateurs) (Butt et al., 2021). En fournissant des informations en temps réel sur les flux d'énergie, les réseaux intelligents permettent aux opérateurs de réseau de vérifier, contrôler, analyser et optimiser la consommation d'énergie. L'objectif des réseaux intelligents est d'utiliser ces informations collectées pour ajuster le flux d'électricité et, par conséquent, garantir des réseaux plus efficaces sur le plan énergétique. En outre, les réseaux intelligents assurent l'équilibre entre l'offre et la demande et empêchent la surchauffe des réseaux. Enfin, ils peuvent contribuer à combler le fossé dans la transition des ressources énergétiques des combustibles fossiles vers les énergies renouvelables (Butt et al., 2021).

D'une manière générale, les technologies de l'hydrogène

et les batteries vertes, qui font l'objet des deux groupes de compétences précédents, sont totalement dépendantes des réseaux intelligents pour l'analyse en temps réel de la consommation d'électricité. De plus, les réseaux intelligents permettent d'optimiser en temps réel l'utilisation de l'énergie, de réduire les pertes d'énergie et d'optimiser l'intégration des capacités de stockage des batteries dans le réseau pour une meilleure stabilisation. Il convient de noter ici que les réseaux intelligents sont parfaitement adaptés aux technologies d'énergie renouvelable, car ils peuvent être ajustés à tout moment en intégrant différentes sources d'énergie renouvelable sans compromettre l'efficacité, et ils contribuent implicitement à la réduction des émissions de carbone. Il est important de réaliser que la gestion intelligente de l'électricité est l'une des clés de la réussite de la transformation du marché de l'énergie. (Bayindir et al. 2016).

L'objectif du groupe de compétence sur les réseaux intelligents est de cartographier le système de transmission transnational régional existant et de recueillir des informations sur le potentiel des énergies renouvelables et son lien avec le développement de scénarios pour les réseaux énergétiques régionaux. En outre, l'objectif est d'étudier le potentiel de la gestion de la demande, et à cette fin, il est impératif d'identifier les éventuels points faibles en

termes de disponibilité de l'énergie. Les idées visant à actualiser le concept de connexion des réseaux électriques entre la France et l'Allemagne et à présenter les possibilités d'extension des réseaux de transport constituent un autre point fort de ce groupe. La mise en œuvre de tels concepts permet de comparer les alternatives techniques disponibles pour l'amélioration des réseaux et des connecteurs et soutient l'expansion vers plus d'énergies renouvelables. Le développement de concepts discrets permet également de trouver de meilleures idées pour optimiser la capacité de transmission des lignes aériennes existantes et d'analyser les exigences de sécurité du système dans les installations de production d'énergie renouvelable. L'un des principaux défis du concept transfrontalier consiste à intégrer la production fluctuante d'électricité issue des énergies renouvelables dans le réseau électrique transnational. L'objectif est donc de concevoir et d'exploiter un réseau de transport d'électricité qui soit à la fois flexible et adapté aux différentes installations de production d'électricité. Dans le cadre du concept d'innovation transfrontalier pour le territoire de Fessenheim, l'objectif est de concevoir et d'exploiter le réseau de transport d'électricité et de l'adapter aux différentes installations de production d'électricité ainsi qu'aux demandes de flexibilité accrue du système global.

L'analyse du groupe de compétence a mis en évidence des défis techniques tels que l'utilisation diversifiée de l'énergie, la sécurité et l'utilisation du réseau électrique, ainsi que l'intégration dans le réseau de l'e-mobilité et de nouvelles capacités de stockage. Ces défis incluent également les aspects économiques et sociétaux, comme des modèles économiques adaptés, l'acceptabilité sociale et les contraintes juridiques et de sécurité.

Pour mieux comprendre les défis régionaux, le groupe de compétence a organisé deux séminaires de travail en juillet et a associé les résultats à d'autres contributions des milieux scientifiques, industriels et communautaires. Les résultats de ces séminaires ont été réduits à des objectifs, décrits plus en détail dans le texte ci-dessous, qui ont guidé le développement des idées pilotes. En conséquence, il est apparu clairement que pour faire progresser les applications de réseaux intelligents, le réseau transfrontalier existant doit être cartographié afin d'identifier les faiblesses potentielles liées à l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le réseau, notamment en ce qui concerne les connecteurs et les charges électriques des différents systèmes de réseaux nationaux pour les niveaux de moyenne et basse tension. Premièrement, l'ingénierie des réseaux électriques est nécessaire pour améliorer physiquement le réseau électrique régional existant. Ensuite, la mise en place de bancs d'essai pour des unités de voisinage plus petites, comme des parcs industriels ou des zones d'habitation, est également nécessaire pour comprendre fondamentalement la fonctionnalité des réseaux intelligents en intégrant des capacités de stockage

comme des batteries stationnaires ou des voitures électriques, afin de connaître les défis de la gestion des réseaux intelligents. Enfin, la fonctionnalité et l'impact des systèmes de réseaux intelligents sur la stabilisation des réseaux et la manière de gérer efficacement l'énergie doivent être testés en tant que méta-démonstrateur dans une situation transfrontalière, comme le parc EcoRhena peut le permettre.

Dans la région du Rhin supérieur, les acteurs industriels établis allant des producteurs d'énergie aux industries de consommation (gestion de l'énergie, chimie, automobile, etc.) et les services d'ingénierie existants sont des atouts pour le développement de projets pilotes de réseaux intelligents. En outre, les compétences techniques et scientifiques nécessaires à la mise en œuvre des projets pilotes sont disponibles dans la région. Notamment, un autre atout qui soutient les projets pilotes est l'engagement des autorités locales et de nombreuses entreprises dans des stratégies de modification des sites industriels ou des quartiers afin de réduire leur impact carbone, voire d'obtenir la certification ISO 50 001 (gestion de l'énergie). Afin de cerner tous les défis et toutes les possibilités d'innovation en matière de réseaux intelligents dans la région du Rhin supérieur, trois projets pilotes sont proposés:

- **Pilote 1:** Mise en place de quartiers jumelés, quartiers durables entre Mulhouse et– Karlsruhe.
- **Pilote 2:** Intégration de bornes de recharge électrique pour l'e-mobilité dans les quartiers et méta-démonstrateurs pour une gestion plus intelligente des énergies renouvelables.
- **Pilote 3:** Cartographie de la situation du réseau régional et modélisation des scénarios futurs pour le renforcement des réseaux régionaux afin d'échanger de l'électricité volatile sur différents niveaux de tension.

Recommandations

Le groupe de compétence « Réseaux intelligents » recommande l'installation d'un système de réseau intelligent (figure 7) dans deux quartiers (pilote 1) en France et en Allemagne, en tant que bancs d'essai pour la gestion des réseaux intelligents, comme la consommation d'électricité contrôlée et efficace à la demande. L'idée est d'intégrer des systèmes de réseaux intelligents dans des quartiers de Mulhouse et de Karlsruhe. Le lieu a été choisi en raison de l'ouverture des communes à la mise en place d'un tel pilote: à Karlsruhe, la mise en œuvre du réseau intelligent de voisinage a déjà commencé, tandis que la commune de Mulhouse est prête à investir dans cette idée. Il est recommandé de transférer le savoir-faire acquis à partir des systèmes de réseaux intelligents testés dans les deux quartiers vers la mise en œuvre prévue du parc d'innovation

franco-allemand EcoRhena, en tant qu'exemple de méta-démonstrateur transfrontalier. Ce pilote permettra d'atteindre les objectifs suivants : démontrer comment les réseaux intelligents favorisent la réduction de la consommation d'énergie, l'intégration et le stockage intelligent des énergies renouvelables, le couplage des sources d'électricité, la gestion de la chaleur et du froid et la création de modèles exportables.

Le groupe recommande de tester l'intégration des batteries d'e-mobilité dans le système de réseaux intelligents parallèlement à la mise en œuvre des quartiers intelligents (pilote 2) afin d'acquérir des connaissances sur la manière dont cette intégration peut améliorer la gestion du réseau électrique et sur la façon dont les obstacles techniques, économiques et sociétaux peuvent être résolus. Les objectifs de ce pilote sont d'améliorer la compréhension de la manière d'optimiser le réseau de stations de recharge d'un quartier et le couplage entre le réseau de charge et le réseau de distribution dans le but de réduire les pics de puissance avec l'utilisation du stockage par batterie de l'e-mobilité, d'obtenir le meilleur profil et les meilleurs modèles d'utilisation, de soutenir la standardisation transfrontalière des réseaux de recharge. À cette fin, les stations de recharge de l'e-mobilité pour les voitures et les vélos doivent être incluses dans la conception des quartiers du réseau intelligent. Il est suggéré de commencer par les quartiers industriels en établissant des stations de recharge électrique qui serviront de bancs d'essai pour les applications du réseau intelligent. Le résultat pourrait être de montrer comment les stations de recharge d'e-mobilité

intégrées dans un réseau intelligent peuvent contribuer à économiser de l'énergie et à optimiser la distribution d'énergie en termes de disponibilité et d'accessibilité.

Une autre recommandation est de cartographier (pilote 3) le réseau électrique régional existant et d'analyser ses faiblesses pour optimiser les échanges transfrontaliers d'électricité, ainsi que d'étudier sa capacité à se stabiliser en cas de production d'électricité volatile. Les objectifs de ce pilote sont basés sur la politique énergétique de l'Union européenne, qui comprend la stabilisation du réseau en maintenant la fréquence à 50 Hz, l'optimisation et la décarbonisation du mix énergétique, et l'intégration des réseaux locaux au réseau transnational. Les capacités des réseaux existants et les simulations de profils de charge pour les différents scénarios d'installations renouvelables fournis par l'étude RES-TMO devraient faire partie de ce pilote.

Par ailleurs, le groupe de compétence sur les réseaux intelligents n'a pas pris en compte le réseau de gazoducs parce qu'il ne s'agissait pas de son objectif principal, mais il recommande que ce facteur soit étudié comme prochaine étape pour assurer une transformation énergétique intégrée.

Enfin, chacun de ces projets pilotes nécessite des ressources substantielles et la participation des opérateurs de réseau ainsi que des communautés et de l'industrie.

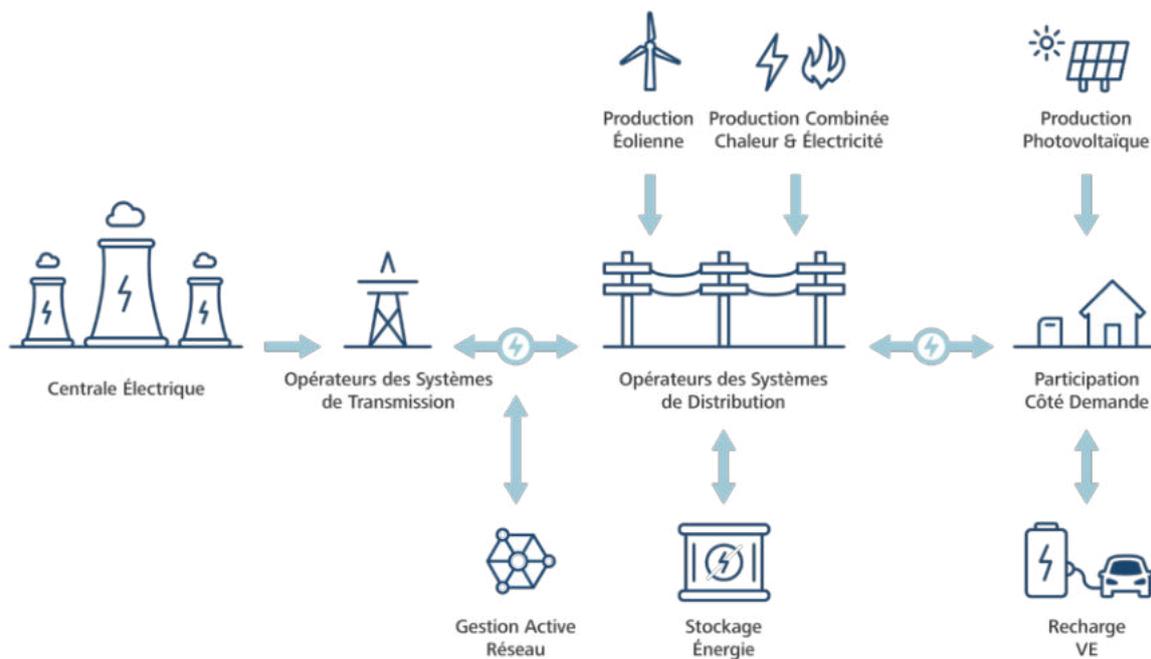


Figure 7: Un banc d'essai possible pour un système de réseau intelligent dans les projets pilotes de quartier (Source: Gestionnaires de réseaux de distribution européens (E.DSO))

07. Cadre territorial

La région du Rhin Supérieur est forte d'une expertise scientifique qui lui permet de faire face aux défis technologiques que peut représenter toute idée innovante. Le principal défi à surmonter reste cependant le défi territorial. Le territoire est en effet un objet complexe, et encore plus complexe lorsqu'il revêt une nature transnationale. Le territoire possède de multiples dimensions, dans lesquelles le projet global doit s'inscrire.

Le groupe de compétence « Cadre territorial » est un groupe de recherche franco-allemand pluridisciplinaire qui s'articule autour de quatre piliers thématiques: acceptabilité sociale, impact environnemental, métabolisme territorial et cadre juridique. Mis bout à bout, ces piliers permettent de dessiner les conditions générales de la région d'innovation de Fessenheim. Ce groupe accompagne les trois autres groupes de compétence de l'étude de faisabilité dans le développement d'idées concrètes pour le territoire (figure 8). Son objectif est de dresser le tableau complet des aspects territoriaux qui pourraient avoir un impact sur le projet dans son ensemble. Les principales conclusions sont résumées dans les paragraphes thématiques qui suivent, et sont accompagnées de recommandations potentielles quant aux mesures à prendre.

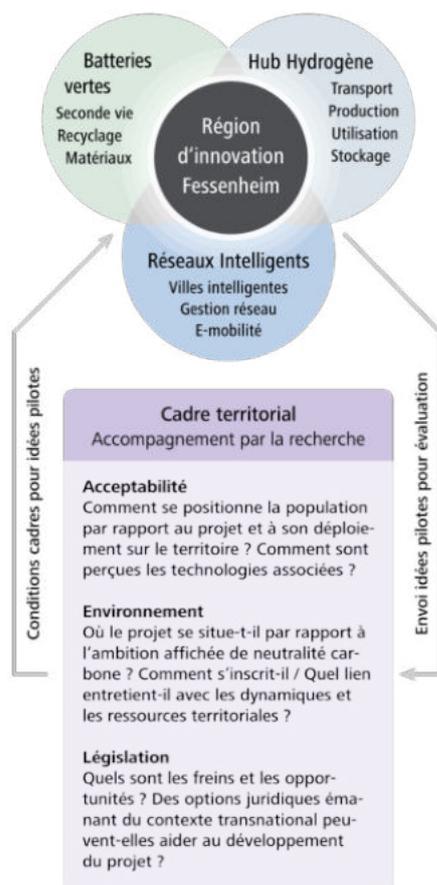


Figure 8: L'interconnexion du groupe « Cadre territorial » et des autres groupes de compétences

Recommandations

► Acceptabilité sociale

L'acceptabilité sociale des nouvelles innovations est cruciale (Patenaude, 2014). Les besoins, les perceptions et les changements possibles de la société ainsi que les questions éthiques doivent être pris en compte. Il ressort des études menées que les technologies vertes ont généralement le soutien du public. L'hydrogène semble être la technologie la plus acceptable, suivie des batteries vertes puis des réseaux intelligents. Un examen plus approfondi des différents paramètres révèle que la connaissance objective a peu d'influence sur le niveau d'acceptabilité et que la confiance [dans les différentes parties prenantes] a un effet modeste mais réel. Les leviers les plus prometteurs qui ont été identifiés et qui sont susceptibles d'avoir un impact positif sont l'image véhiculée (affect) et les bénéfices associés. Tous deux sont en effet positivement corrélés au niveau d'acceptabilité. À cet égard, l'hydrogène, en plus d'être la technologie la plus acceptable, véhicule l'image la plus positive et présente le meilleur rapport bénéfices-coûts par rapport aux deux autres.

C'est pourquoi nous recommandons une communication soignée. Plus l'image est positive (affect positif), plus le projet a de chances d'être considéré comme acceptable. De même en ce qui concerne les bénéfices: plus le projet est perçu comme une source de bénéfices, plus il a de chances d'être considéré comme acceptable. L'effet est encore plus prononcé pour les bénéfices environnementaux associés. La communication est essentielle pour construire l'image qui sera ensuite associée à la technologie/au projet. Par conséquent, les éléments de communication doivent être soigneusement conçus pour soutenir cet objectif (Bostrom et al., 2018 ; Hoffrage & Garcia-Retamero, 2018 ; Peters et al., 2006).

D'autre part, l'acceptabilité dépend également de la manière dont le déploiement du projet est envisagé sur le territoire. Une autre recommandation serait d'impliquer la population locale dès le début – de l'idée du projet à son développement concret. Le meilleur moyen d'y parvenir serait la transparence entre le promoteur et la population locale et la consultation dans le développement du projet. La co-construction du projet est donc un autre levier intéressant à explorer.

► Impact environnemental

Pour les projets innovants, la transformation verte d'un territoire implique le plus faible impact sur l'environnement (Söderholm, 2020). Tous les projets pilotes n'ont pas pu être individuellement évalués sur la durée de l'étude de faisabilité; pour cette raison, le choix a été fait de se concentrer principalement sur l'évaluation de l'impact des

différents scénarios possibles pour le recyclage des batteries lithium-ion (LIB) et les différents moyens de production d'hydrogène existants.

Le recyclage des LIB n'en est encore qu'à ses débuts, mais il sert deux objectifs ultimes: limiter le dépôt de batteries dans les décharges et diminuer la pression sur les ressources rares (Harper et al., 2019). Quatre scénarios de recyclage ont été étudiés, chacun consistant en une combinaison spécifique de processus élémentaires. Alors que les données concernant les processus de recyclage des LIB sont encore rares, l'analyse d'impact a mis en évidence un scénario comme étant le plus efficace d'un point de vue environnemental. En outre, il est encore possible d'optimiser les processus de recyclage et de réduire encore leur impact sur l'environnement (utilisation de produits chimiques moins polluants). Il est également intéressant de noter que d'autres technologies innovantes méritent d'être prises en considération, car elles pourraient permettre de raccourcir la boucle du modèle d'économie circulaire. Par exemple, la régénération directe permettrait de remettre à neuf les batteries au lieu d'en produire de nouvelles à partir de matériaux récupérés (Li et al., 2017; Fan et al., 2021). Des batteries de type «LEGO» qui faciliteraient considérablement le démantèlement pendant le processus de recyclage sont également en cours de développement (Tarascon et al., 2021). Les deux technologies mentionnées précédemment permettraient d'obtenir des impacts environnementaux encore plus faibles.

En ce qui concerne l'hydrogène, plusieurs moyens de production ont été évalués. L'étude a montré que l'électrolyse à haute température est effectivement le meilleur compromis du point de vue environnemental, surtout si l'infrastructure est alimentée par un réseau de vapeur sur place. La production d'hydrogène par électrolyse est en accord avec l'ambition affichée de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de tendre vers la neutralité carbone.

► Métabolisme territorial

Un territoire est une entité vivante dont le métabolisme peut être étudié afin d'analyser les ressources mobilisées et de questionner l'ancrage territorial d'un projet (Ribon et al., 2018). La sélection d'indicateurs pertinents permet de mesurer la connexion potentielle aux dynamiques territoriales existantes et d'identifier les zones d'implantation préférentielles. S'appuyer sur le tissu industriel existant et créer des synergies par un couplage sectoriel constitue une stratégie gagnant-gagnant qui, à terme, permettra non seulement de fournir des sources d'énergie alternatives et décarbonées mais aussi de défossiliser les modes de production des industries existantes.

Le projet Batteries Vertes s'appuie sur le marché en pleine expansion de l'e-mobilité. L'approche de l'économie circulaire est essentielle à cet égard et offre des perspectives

intéressantes pour une seconde vie et le recyclage des batteries en fin de vie. La taille du pilote répond à la demande actuelle du Rhin supérieur (1 tonne de batteries de voitures par jour); toutefois, la demande régionale en forte croissance devrait à terme porter ce chiffre à 250 tonnes par jour. De plus, le site d'installation de l'usine devra tenir compte des évolutions technologiques du recyclage des batteries qui pourraient nécessiter un espace supplémentaire pour l'expérimentation. Les différentes technologies incluses dans le projet ont des niveaux de préparation technologique et des calendriers distincts. Bien que ce facteur puisse conduire à des synergies potentielles, des interférences ou des dépendances peuvent apparaître et doivent être prises en compte. Certaines technologies pourraient nécessiter des partenaires politiques et industriels au-delà du Rhin supérieur. Par ailleurs, la région du Rhin supérieur dispose de gisements de minéraux importants pour les batteries et nous recommandons de (ré)exploiter ces gisements de ressources primaires, notamment ceux de lithium et de nickel.

Le projet Hydrogène peut bénéficier de quelques potentiels de synergie sur le territoire et pourrait être mis en œuvre sur plusieurs sites pour développer un écosystème de l'hydrogène. Cependant, la principale contrainte réside dans les capacités de production d'électricité limitées localement, ce qui pourrait entraver la capacité de production d'hydrogène basée principalement sur l'électrolyse. L'utilisation des ressources de la biomasse pour produire de l'hydrogène est une alternative intéressante, compatible avec les ressources du territoire, qui mérite d'être approfondie malgré le fait qu'elle soit moins mature que l'électrolyse. Cela vaut également pour d'autres moyens de production innovants (tels que le biogaz, la thermolyse, le craquage thermique) qui sont en cours de développement et qui permettraient de réduire la pression sur les capacités locales de production d'électricité.

Le projet Réseaux Intelligents repose principalement sur l'optimisation énergétique. La «sobriété énergétique» doit également être soulignée pour l'efficacité des réseaux intelligents, car il s'agit probablement de l'approche la plus importante pour construire un réseau électrique résilient et neutre sur le plan climatique.

De manière plus générale, le déploiement rapide de ces projets semble nécessiter: (i) un consensus partagé des acteurs publics et privés concernés et/ou impliqués dans le développement de la filière, (ii) un soutien public significatif et explicite pour limiter les surcoûts liés aux technologies émergentes, (iii) une plus grande participation des acteurs privés notamment dans le partage de l'information qui est cruciale pour une meilleure compréhension des besoins actuels et potentiels afin de développer les installations appropriées, et (iv) une coordination plus explicite avec les politiques publiques aux différents niveaux territoriaux et avec les territoires environnants.

► Cadre juridique

La transformation de Fessenheim en un territoire durable et innovant soulève des questions juridiques liées à l'existence de deux systèmes législatifs, français et allemand, de part et d'autre de la frontière. Il existe des solutions innovantes au sein de ces législations, mais il convient de les identifier et de les appliquer afin de développer ce projet.

La coopération transfrontalière pourrait être la clé pour développer un cadre juridique attractif qui favoriserait la concrétisation du projet. Si des obstacles juridiques devaient être identifiés pour le couplage transfrontalier envisagé de technologies vertes ou la mise en œuvre d'installations spécifiques, etc., la coopération transfrontalière pourrait agir comme un outil juridique permettant aux territoires confrontés aux mêmes problèmes d'expérimenter et de développer des solutions ensemble. Les options juridiques françaises existantes pour les projets innovants pourraient être appliquées et éventuellement étendues à l'Allemagne et vice-versa ou des solutions nouvelles pour les deux pays pourraient être mises en œuvre.

À titre d'illustration, dans le cas de l'hydrogène, par rapport au cadre juridique allemand, l'écosystème français semble être sûr et bien développé étant donné que l'hydrogène est au cœur des stratégies nationales et régionales françaises de transition énergétique (Langstädtler, 2021; Loi 2019-1147, 2019). Actuellement, le cadre juridique français est approprié pour développer des projets pilotes et favoriser les projets innovants (Code de l'Énergie - Livre VIII ; Ordonnance n°2021-167, 2021). Ces innovations permettent d'éventuelles dérogations légales telles que les bacs à sable réglementaires pour faire face aux éventuels obstacles juridiques qui pourraient survenir, s'ils sont éligibles. Les obstacles juridiques n'impliquent qu'une dérogation légale au droit français. Si le besoin s'en fait sentir, une solution intéressante pour un projet transfrontalier confronté à un obstacle juridique pourrait être d'appliquer les règles françaises qui offrent actuellement un cadre juridique plus favorable.

En ce qui concerne les batteries, l'installation d'une unité de production nécessite une autorisation dans les deux systèmes législatifs en raison des préoccupations environnementales (n.d BIMSchG ; n.d Code de l'environnement). Cette procédure longue et coûteuse doit être prise en compte avant toute action concrète. De plus, contrairement à l'Allemagne, il n'existe aucune réglementation spécifique concernant le stockage des batteries en droit français, ce qui constitue un risque juridique sérieux pour le recyclage des batteries. Le lithium étant considéré comme un produit dangereux, il nécessite des moyens de stockage appropriés et un transport réglementé.

Les projets transfrontaliers peuvent bénéficier d'un contexte européen favorable (paquet «Une énergie propre pour tous les Européens», 2019), de sorte que des mécanismes spécifiques de coopération transfrontalière peuvent s'appliquer. La région d'innovation de Fessenheim peut être considérée comme une zone d'innovation bilatérale le long du Rhin. Un tel développement est encouragé par le droit européen de l'énergie (EUR-Lex energy, n.d.) et pourrait faire appel à la clause dérogatoire existant dans le traité d'Aix-la-Chapelle (Traité d'Aix-la-Chapelle - art. 13, 2019). Néanmoins, il existe une limite à la possibilité d'appliquer une dérogation et d'éviter tout dumping normatif: la dérogation doit rigoureusement respecter des règles strictes de protection environnementale et sociale. La clause dérogatoire du traité d'Aix-la-Chapelle reflète également la volonté politique des États français et allemands. En substance, il faut se référer au cadre constitutionnel des États membres comme base juridique impérative.

Dans la plupart des cas, les projets pilotes techniques peuvent être utilisés pour identifier les problèmes et les obstacles juridiques et réglementaires ainsi que pour développer de nouvelles approches juridiques et réglementaires – également au niveau européen – qui sont nécessaires pour étendre les solutions techniques de manière durable.

08. Conclusion

L'étude de faisabilité a démontré que la région d'innovation de Fessenheim est dotée d'un certain nombre d'atouts (voir chapitre 2) qui pourraient l'aider à se développer en un système régional d'innovation transfrontalier européen (CBRIS). Afin d'utiliser efficacement les idées proposées pour son développement, les pilotes sélectionnés doivent être approfondis pour concrétiser et clarifier les idées proposées et pour construire pour chacun d'eux des plans de mise en œuvre distincts. Pour une planification plus détaillée des pilotes ou une sélection de pilotes, un consortium doit être établi avec des parties prenantes

au niveau communal et européen et des partenaires industriels qui possèdent un savoir-faire scientifique et administratif ainsi que des compétences juridiques. Les projets pilotes sélectionnés dans différents domaines peuvent démontrer comment la transformation vers la durabilité est liée aux différents domaines d'innovation technologique. Par exemple, la production d'énergies renouvelables est liée, d'une part, à la capacité de produire de l'hydrogène vert à partir d'électricité et, d'autre part, à des systèmes de réseaux intelligents permettant de distribuer l'électricité de manière optimale et en temps voulu avec

des pertes minimales. Le lien entre la stabilisation du réseau électrique et la capacité de stockage des batteries est tout aussi important, ainsi que le lien entre le stockage des batteries et la nécessité de les recycler pour protéger l'environnement/le climat et réduire la dépendance aux matières premières importées. En gardant à l'esprit les interdépendances, une approche holistique des projets pilotes et de leur mise en œuvre dans une région est essentielle pour comprendre le processus global de transformation vers la durabilité. Le choix de la région du Rhin supérieur et de ses pôles industriels à forte intensité énergétique autour de Bâle, Chalampé et Karlsruhe est un moyen optimal de démontrer les avantages des pôles d'innovation régionaux transfrontaliers en matière de durabilité. En outre, elle offre la possibilité de démontrer, après le démantèlement d'une centrale nucléaire (Fessenheim), comment une région transfrontalière peut être transformée en une région d'innovation prospère et tournée vers l'avenir dans un délai relativement court en réunissant les ressources des deux côtés de la frontière. Avant tout, la réduction de la dépendance aux sources d'énergie fossiles et nucléaires est symbolique pour une région qui a déjà accueilli une centrale nucléaire sur son sol et surtout pour ses citoyens qui ont vécu à proximité de cette centrale et qui sont très attachés à cette question. Par ailleurs, les avantages des pôles transfrontaliers sont nombreux: ils permettent de surmonter les obstacles administratifs et juridiques, de fournir une expertise régionale qui transcende les frontières nationales et d'accélérer le transfert de connaissances entre les entreprises, les sociétés et les organisations scientifiques. Les hubs transfrontaliers augmentent la flexibilité transfrontalière des employés et multiplient les ressources pour des investissements communs. De même, ils font progresser la compréhension interculturelle, rapprochent les visions politiques et renforcent, par des activités communes, la position de l'Europe dans le monde. Un certain nombre d'économistes ont même prouvé que la valeur ajoutée dans les hubs transfrontaliers est très importante (Commission européenne, 2017).

L'étude de faisabilité de la région d'innovation de Fessenheim présente des projets pilotes préliminaires possibles développés sur la base des forces régionales identifiées. L'option la plus réalisable est de mettre en œuvre ces projets pilotes dans la même région, car ils peuvent non seulement fournir des exemples de bonnes pratiques sur la façon dont une transformation innovante vers la durabilité est réalisée, mais aussi démontrer comment les nations des deux côtés d'une frontière peuvent bénéficier d'activités conjointes transfrontalières. Il ressort des différents ateliers de travail avec les partenaires industriels que les projets pilotes proposés sont conformes à leurs plans de développement. Au cours de ces ateliers, les partenaires ont également souligné la nécessité de mettre en œuvre ces projets pilotes dans les délais impartis afin d'ac-

quérir le savoir-faire nécessaire et de les adapter aux installations industrielles. Selon une déclaration de Frans Timmermans, vice-président exécutif chargé du pacte vert pour l'Europe (2022)²: « La transition verte nous libérera de notre dépendance à l'égard des importations d'énergie et d'autres ressources. L'économie circulaire, plus spécifiquement, nous permettra de réduire notre demande en ressources primaires et d'utiliser beaucoup moins d'énergie pour notre production et notre consommation ». Tous les projets pilotes proposés dans l'étude de faisabilité sont conformes à cette déclaration et contribuent à la réalisation de cette exigence. Les pilotes sont détaillés dans le dossier joint à ce document sous la forme de fiche pilote. Ces fiches serviront de base à la concrétisation des idées pilotes. Enfin, la mise en œuvre des projets pilotes nécessite des investissements importants qui doivent être garantis principalement sous forme de fonds de démarrage et de fonds publics, du niveau européen au niveau régional, qui peuvent être utilisés pour affiner et détailler les plans. Des partenariats mixtes public-privé pourraient fournir les investissements requis pour les infrastructures pilotes.

Pour accélérer le processus susmentionné, les prochaines étapes doivent être mises en œuvre dans un délai convenable, conformément aux déclarations des industriels:

1. Formation d'un groupe de gestion chargé de coordonner et d'administrer les activités (y compris les relations publiques) pour la région d'innovation dans le but d'une mise en œuvre pilote.
2. Concrétisation des idées pilotes en détaillant les requêtes de mise en œuvre, comme la compilation des membres de consortiums intéressés provenant de la science et de l'industrie, des administrations et des parties prenantes de la société pour chaque pilote.
3. Elaboration des détails des pilotes et des plans d'exécution.
4. Formation d'un groupe de pilotage pour tous les niveaux de décision liés à la politique, à l'industrie et à la société, ainsi que pour les acteurs régionaux.
5. Formation d'un groupe d'étude du cadre territorial pour accompagner la planification de la mise en œuvre sur les questions environnementales, sociétales et réglementaires.
6. Mise en œuvre d'activités d'approche des investisseurs et d'un plan d'investissement pour les entreprises et les investisseurs publics et privés.
7. Détermination d'une date de début pour les pilotes ainsi que des activités de relations publiques.

² <https://presidence-francaise.consilium.europa.eu/en/news/circular-economy-stakeholder-conference-the-eu-reaffirms-its-ambition-3-03/>

En conclusion, il est impératif que les étapes mentionnées ci-dessus soient exécutées dans des délais brefs. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les réactions recueillies à l'issue des ateliers de travail avec les partenaires industriels indiquent que le temps est essentiel pour prendre les devants dans le domaine de l'innovation et créer un impact dans cette décennie.

Références

- Traité d'Aix-la-Chapelle (2019). Traité entre la République française et la République fédérale d'Allemagne sur la coopération et l'intégration franco-allemandes. Disponible sur: https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/traite.aix-la-chapelle.22.01.2019_cle8d3c8e.pdf
- Bayindir, R., Colak, I., Fulli, G., Demirtas, K. (2016). Technologies et applications des réseaux intelligents. *Revue des énergies renouvelables et durables*. (66), 499-516.
- BlmSchG . n.d. Bundes-Immissions-Schutz-Gesetz Disponible sur: [BlmSchG - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis \(en anglais\)](#)
- Bostrom, A, Böhm, G., O'Connor, R.E. (2018). Communiquer les risques: Principes et défis. Dans M. Raue, E. Lerner, & B. Streicher (Eds.), *Psychological Perspectives on Risk and Risk Analysis: Theory, Models, and Applications*. (251-278). Springer.
- Butt, O.M., Zulqarnain, M., Butt, M.T. (2021). Progrès récents dans la technologie des réseaux intelligents: Perspectives d'avenir dans le réseau électrique. *Ain Shams Engineering Journal*, (12) 1. 687-695.
- CalEPA n.d. Lithium-ion Car Battery Recycling Advisory Group. Disponible à l'adresse suivante: <https://calepa.ca.gov/lithium-ion-car-battery-recycling-advisory-group/>
- Paquet « Une énergie propre pour tous les Européens », (2019). Disponible à l'adresse suivante: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en
- Code de l'environnement. s.d. Disponible sur le site: Code de l'environnement - Légifrance
- Code de l'Énergie - Livre VIII ; Ordonnance n°2021-167 (2021). Ordonnance n° 2021-167 du 17 février 2021 relative à l'hydrogène. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043148001>
- Cousse, J. (2021). Toujours amoureux de l'énergie solaire? Installation size, affect, and the social acceptance of renewable energy technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (145), 111107.
- Dühnen, S., Betz, J., Kolek, M., Schmuch, R., Winter, M., Placke, T. (2020). Toward Green Battery Cells: Perspective sur les matériaux et les technologies. *Petites méthodes*. 4. 2000039. 10.1002/smt.202000039.
- DG Mobilité et Transports de la CE. n.d. Consulté le 27.02.2022 sur https://transport.ec.europa.eu/index_en
- Commission européenne (2017). Quantification des effets des obstacles juridiques et administratifs aux frontières dans les régions frontalières terrestres. Rapport final. Disponible en ligne: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/2014/boosting_growth/quantif_effect_borders_obstacles.pdf
- Gestionnaires de réseaux de distribution européens (E.DSO) (n.d.). Les gestionnaires de réseaux de distribution (GRD). Disponible à l'adresse suivante: <https://www.edsofsmartgrids.eu/home/why-smart-grid>
- Europa.eu. 2021. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions "Fit for 55": delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality COM/2021/550. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>
- EU -lex Energy. s.d. Accès au droit de l'Union européenne. Énergie. Disponible à l'adresse suivante: https://eur-lex.europa.eu/summary/chapter/energy.html?root_default=SUM_1_CODED=18
- Fan et al., 2021: Fan, Xiaoping, Chunlei Tan, Yu Li, Zhiqiang Chen, Yahao Li, Youguo Huang, Qichang Pan, Fenghua Zheng, Hongqiang Wang, et Qingyu Li. 2021. In A Green, Efficient, Closed-Loop Direct Regeneration Technology for Reconstructing the Li-Ni0.5Co0.2Mn0.3O2 Cathode Material from Spent Lithium-Ion Batteries. *Journal of Hazardous Materials* 410 (mai): 124610. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124610>.
- Institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire-ISE (2020). Agrivoltaïque: Opportunités pour l'agriculture et la transition énergétique. Disponible à l'adresse: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/APV-Guideline.pdf>
- Boons, F., Montalvo, C., Quist, J., Wagner, M. (2013). Innovation durable, modèles d'entreprise et performance économique: une vue d'ensemble, *Journal of Cleaner Production*, (45), 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.013>.
- Gernaat, D.E.H.J., de Boer, H.S., Daioglou, V. et al. (2021) Author Correction: Climate change impacts on renewable energy supply. *Nat. Clim. Chang.* (11), 362. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01005-w>
- Hafenverwaltung Kehl. 2015. Deutsche Häfen am Oberrhein. Retrieved from: https://www.raonline.ch/pages/edu/st4/wawa_rhein0102a.html
- Harlé P., Kushnir A. R.L., Aichholzer C., Heap M. J., Hehn R., Maurer V., Baud P., Richard A., Genter A. & Düringer P. (2019), Heat Flow Density Estimates in the Upper Rhine Graben Using Laboratory Measurements of Thermal

- Conductivity on Sedimentary Rocks, *Geothermal Energy*, 7 (1): art. 38, <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0154-3>
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K.G., Gaines, L., Anderson, P. (2019). Recyclage des batteries lithium-ion des véhicules électriques. *Nature*. 575 (7781), 75-86.
- Hoffrage, U., Garcia-Retamero R. (2018). Améliorer la compréhension des informations numériques pertinentes pour la santé. Dans M. Raue, E. Lerner, & B. Streicher (Eds.), *Psychological Perspectives on Risk and Risk Analysis. Théorie, modèles et applications*. (279-298). Springer.
- Interreg Rhin supérieur (2019). Analyse des Programmes Interreg V OBERRHEIN Endbericht. 11.06.2019. Disponible sur: <https://www.interreg-oberrhein.eu/wp-content/uploads/3-analyse-des-programmgebieten.pdf>
- Jäger T., McKenna R., Fichtner W. (2016). Le potentiel d'énergie éolienne terrestre réalisable dans le Bade-Wurtemberg: A Bottom-up Methodology Considering Socio-Economic Constraints, *Renewable Energy*, (96), 662-675. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.013>.
- Jung, W., Engelke, D., Brester, B., Putlitz, A. 2012. Ulysses: Utilisation des résultats de la recherche appliquée de l'ORATE comme critère pour la planification du développement territorial transfrontalier. Rapport scientifique pour le rapport final Analyse territoriale multithématique de la région métropolitaine trinationale du Rhin supérieur. ESPON & Karlsruhe Institute of Technology. Disponible sur: https://www.espon.eu/sites/default/files/attachments/ULYSSES_Final_Report_-_Scientific_Report_-_CS1_Upper-Rhine_MTA.pdf
- Komiyama, H., Takeuchi, K. (2006). Sustainability science: building a new discipline. *Sustainability Science* 1 (1): 1-6.
- Langstädtler, S. (2021). Brauchen wir ein Wasserstoffinfrastruktur Gesetz ? Zum planungs- und genehmigungsrechtlichen Rahmen für die Erzeugung, Verteilung und Speicherung von grünem Wasserstoff. *ZUR Zeitschrift für Umweltrecht*. 32(4), 203-211.
- Li, X., Zhang, J., Song, D., Song L., Zhang, L. (2017). Régénération directe d'un mélange de matériaux cathodiques recyclés à partir de batteries LiFePO4 mises au rebut. *Journal of Power Sources*. (345). 78-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.118>.
- Lopez, A., Roberts, B., Heimiller, D., Blair, N., Porro, G. 2012. U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis. Technical Report NREL/TP-6A20-51946 July 2012. Available online: <https://www.nrel.gov/docs/ft12osti/51946.pdf>
- Loi 2019-1147 (2019). LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat. Disponible sur: LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat - Dossiers législatifs - Légifrance
- Miocic, J. (2021). Stockage de l'hydrogène dans le Fossé du Rhin supérieur. Analyse du potentiel. Rapport Work Package 2.2. Disponible sur: https://www.res-tmo.com/fileadmin/PDFs/Outputs/RES_TMO_Bericht_H2_Speicherung_ORG_EN.pdf
- Mossali, E., Picone, N., Gentilini, L., Rodriguez, O., Manuel Pérez, J., Colledani, M. (2020). Les batteries au lithium-ion vers l'économie circulaire: Une revue de la littérature sur les opportunités et les enjeux des traitements de recyclage. *Journal of Environmental Management*. (264), 110500.
- National Renewable Energy Laboratory n.d. Consulté le 21.02.2022 sur <https://www.nrel.gov/>.
- Neef, C., Schmalz, T., Thielmann, A. (2021). Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau Kurzstudie im Auftrag der IMPULS-Stiftung (Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik) Recycling of Lithium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges for Mechanical and Plant Engineering. Disponible à l'adresse suivante https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-6434738.pdf
- Patenaude, J. (2014). Évaluer l'acceptabilité sociale des nouvelles technologies: Lacs et tensions entre science et réglementation. *BioéthiqueOnline*. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/269573770_Assessing_the_Social_Acceptability_of_New_Technologies_Gaps_and_Tensions_Between_Science_and_Regulation
- Peters, E., Västfjäll, D., Slovic, P., Mertz, C.K., Mazzocco, K., & Dickert, S. (2006). Numeracy and decision making. *Psychological Science*, 17, 407-413.
- Ribon et al. 2018: Ribon B., Badariotti D. et Kahn R. 2018. Fondements des analyses de flux de matières et d'énergie et typologies d'applications pour la gouvernance des territoires et des organisations. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 18 numéro 2. DOI: 10.4000/vertigo.20822
- Regierungspräsidium Freiburg, s.d., Rhin supérieur. Disponible à l'adresse suivante: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpf/sgz-en/upper-rhine/>
- Samsatl, S., Samsatl, J.N (2019). Le rôle de l'hydrogène renouvelable et du stockage intersaisonnier dans la décarbonisation de la chaleur - Optimisation globale des futures

chaînes de valeur des énergies renouvelables. *Énergie appliquée*, (233-234). 854-893.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.159>.

Schumacher et al. (Eds.) (2017): Schumacher K., Fichtner W. & Schultmann F., *Innovations for Sustainable Biomass Utilization in the Upper Rhine Region*, KIT Scientific Publishing, doi: <https://doi.org/10.5445/KSP/1000048433>

Spangenberg, J. (2011). La science de la durabilité: Une revue, une analyse et quelques leçons empiriques. *Environmental Conservation*, 38(3), 275-287.
doi:10.1017/S0376892911000270

Specht, M., Zuberbühler, U. ; Wittstadt, U. (2004). *Regenerativer Wasserstoff - Erzeugung, Nutzung und Syntheserohstoff*. Stadermann, G.; Forschungsverbund Sonnenenergie -FVS-: Wasserstoff und Brennstoffzellen-Energieforschung im Verbund: Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie, 25.-26.11.2004 in Berlin. Berlin: FVS, 2005 (Forschungsverbund Sonnenenergie. Themen 2004). S.33-40 Disponible sur le site:
Le Wasserstoff régénéré - Extraction, utilisation et synthèse du Wasserstoff

Tarascon et al., 2021: Tarascon, J.-M. 2021. Batteries: Constituants, Évolution des recherches, Batterie 2030+. Le tout en 5 min. Webinar, 13 avril. <https://www.concer-tation-acc-batteries.fr/compte-rendu-et-replay/7>.

La Conférence du Rhin supérieur. (2020). Brochure statistique de l'Oberrhein. Récupéré de: https://www.ober-rheinkonferenz.org/de/statistik/downloads.html?file=files/assets/ORK/docs_de/allgemein/broschueren/statisikbro-schuere-oberrhein-2020.pdf&cid=2792