

<b>Sujet proposé</b>	<i>Développement d'une méthodologie de planification énergie-climat à l'échelle métropolitaine à l'aide d'outils d'aide à la décision pour une décentralisation coordonnée et concertée.</i>
<b>Spécialité du doctorat</b>	<i>Sciences de la Terre et Environnement</i>
<b>Université d'inscription</b>	<i>Université de Strasbourg</i>
<b>Direction de thèse</b>	<i>Nadège Blond (LIVE), Thierry de Laroche Lambert (FEMTO-ST)</i>
<b>Laboratoire(s) d'accueil</b>	<i>Laboratoire Image Ville Environnement (LIVE) UMR 7362</i>
<b>Cofinancement demandé</b>	<i>ADEME, Eurométropole de Strasbourg, ATMO Grand Est</i>

<b>Résumé</b>	L'accélération nécessaire de la transition énergétique et écologique requiert des actions concertées entre tous les acteurs socio-économiques et universitaires de la société jusqu'à l'échelle de la commune. Elle nécessite la mise en place de bases de données énergie-climat détaillées, pérennes et transparentes, ainsi que des outils de simulation des planifications locales éprouvés, dont les résultats puissent être exploitables par tous les acteurs pour définir des stratégies efficaces de sobriété, d'efficacité et d'investissement énergétiques. Le présent projet propose <b>d'adapter une méthodologie de planification énergie-climat, basée sur la gestion de la flexibilité via une approche multi-vecteurs énergétiques, participative et délibérative, éprouvée au Danemark, à l'échelle d'une collectivité intercommunale française.</b> Sa mise en pratique permettra d'analyser les opportunités de la prospective à la planification énergie-climat et au pilotage de la transition énergétique et écologique, ainsi que les freins structurels, administratifs et socio-économiques à lever pour atteindre au plus vite la neutralité carbone.
<b>Mots clés</b>	Energie, Climat (émissions de gaz à effet de serre), Pollution de l'air, planification, transition, concertation

## 1 Contexte et enjeux scientifiques

Actuellement, 88% des émissions de gaz à effet de serre (GES) émis résultent de la combustion de combustibles fossiles, contribuant à l'augmentation de leur concentration atmosphérique ([Ministère de la transition énergétique, 2022](#)). Cette augmentation est le principal moteur du dérèglement climatique global dont les conséquences sont désormais visibles partout dans le monde ([Mukherji et al., 2023](#)). Réduire massivement et très rapidement les émissions de GES pour en réduire les impacts sur nos sociétés est l'enjeu majeur actuel. Il faudrait réduire de 45% les émissions de CO<sub>2</sub> en 2030 par rapport à 2010 pour atteindre la « neutralité carbone » en 2050, ce qui permettrait de maintenir le réchauffement de la Terre sous 1,5°C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle. Prenant conscience des transformations à opérer, 195 pays ont signé les accords de Paris en décembre 2015 ([ONU, 2015](#)). Malheureusement, l'après-covid a montré des émissions toujours très importantes, indiquant même l'année 2022 comme une année record dans les subventions dans les énergies fossiles ([AIE, 2023](#)). Sans politiques internationales plus contraignantes, le réchauffement à prévoir est de l'ordre de 3,2°C (entre 2,2 et 3,5°C) d'ici 2100 ([Mukherji et al., 2023](#)). Chaque demi-degré gagné permettra d'éviter les plus grandes crises que déclencherait l'emballement du système terre-atmosphère-océan. La demande en énergie peut être réduite par la sobriété individuelle et collective de tous les acteurs socio-économiques, l'augmentation de l'efficacité énergétique, la mise en place coordonnée d'une véritable écologie industrielle, et le développement accéléré et massif des filières de production et de stockage multi-échelles des énergies renouvelables. L'avantage majeur des énergies renouvelables éolienne, solaire et houlomotrice est qu'elles sont des énergies de flux naturelles, sans extraction, surabondantes et disponibles sur le territoire. Leur production, certes variable, est modélisable, prévisible et complémentaire ([Foley et al., 2012](#)). Cette variabilité et celle des consommations est parfaitement gérable aujourd'hui pour limiter les besoins en stockage, et le sera davantage à l'avenir en les complétant par des productions pilotables (hydroélectricité, géothermie, cogénération biomasse-biogaz, et éventuellement nucléaire) ; en jugulant les surconsommations ; en décalant les puissances

appelées ; en couplant les réseaux (électricité, chaleur, froid, gaz, mobilités) et les stockages énergétiques aux différentes échelles spatiales (locale, régionale, nationale, internationale) et temporelles (jour, semaine, saison, année), tout en assurant à tout instant la stabilité et la sécurité du système énergétique (Al kez et al., 2020).

Une infinité de scénarios peuvent être déclinés en combinant les technologies actuelles et futures pour produire, stocker et convertir les énergies nécessaires à tout instant aux besoins énergétiques réels des différents secteurs économiques répondant aux enjeux climatiques, écologiques et sanitaires mondiaux. Chaque technologie utilise des ressources différentes (renouvelables ou non) et impacte différemment l'environnement en termes d'émissions de GES, de consommation d'eau et de pollutions diverses. Le choix du meilleur scénario se pose dans toutes les régions du monde et fait particulièrement débat en France, questionnant la place du nucléaire et du charbon dans les mix électriques.

Les outils de planification énergétique les plus utilisés en France sont le plus souvent basés sur les systèmes énergétiques à basse résolution spatiale, ou spécialisés dans l'étude des systèmes électriques (Després et al., 2017) et orientés vers l'estimation des coûts économiques de chaque scénario (Shirizadeh and Quirion, 2022). Ces coûts sont des indicateurs essentiels, mais sont incertains, incomplets, biaisés et évolutifs. Les coûts électronucléaires sont par exemple régulièrement réévalués à la hausse (sûreté post-Fukushima, vieillissement, démantèlements, déchets nucléaires). À l'inverse, les coûts des technologies renouvelables, des stockages électriques et thermiques baissent fortement et régulièrement depuis des décennies grâce aux progrès de la recherche (efficacité, ruptures technologiques, rendements, économie de matériaux), même s'ils ne prennent pas toujours en compte les seconds usages possibles et la valorisation des matériaux issus du recyclage ou des montées en gamme.

Le concept de « systèmes énergétiques renouvelables intelligents » (SERI) (de Larochembert 2022a, Larochembert, 2023; Nadaï et al., 2015) à couplages locaux des réseaux d'énergie et des stockages multi-énergies-échelles a été récemment proposé pour accroître la flexibilité de systèmes énergétiques locaux et baisser les besoins et coûts associés en stockage.

Le système énergétique français, très centralisé apparaît encore à ce jour peu résilient (arrêt des centrales nucléaires, dépendances aux énergies fossiles mises une nouvelle fois en évidence avec la guerre en Ukraine et la pénurie de gaz qui a suivi, sensibilité au changement climatique, etc.), inefficace (chaleur fatale non utilisée, chauffage électrique, etc.) et peu adapté à l'évolution vers des SERI avec une multiplicité des producteurs-consommateurs-stockeurs locaux et les couplages intersectoriels (Ministère de la transition énergétique, 2020). Pour valoriser les ressources énergétiques renouvelables, mettre en place des structures énergétiques intersectorielles efficaces, et éliminer ainsi rapidement les émissions de gaz à effet de serre, il faudrait développer de nouvelles méthodes de planification énergie-climat, basée sur des bases de données détaillées, assurant un suivi local maîtrisé, une coordination étroite entre échelons locaux, régionaux et nationaux pour accroître l'autonomie énergétique locale garante d'efficacité et renforcer la souveraineté nationale et européenne en énergie et matériaux (Nadaï et al., 2015). Si des Observatoires Régionaux énergie-climat ont été récemment mis en place, la mesure des flux énergétiques, des investissements et des coûts relatifs à l'énergie, des émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre dans la comptabilité des communes et plus généralement des collectivités locales est pourtant souvent dispersée. Bien que quelques communes prennent pourtant des initiatives pour créer des comptabilités écologiques, il y a un **besoin urgent de création d'un tableau de bord énergie-climat uniforme pour l'ensemble des communes de France** pouvant être directement renseigné par les communes, comme outil de planification et de suivi de la transition énergétique.

La méthodologie danoise de planification énergétique, proposée depuis les années 80 par les chercheurs de l'Université d'Aalborg à Copenhague avec l'association des ingénieurs danois, offre une méthode de type « *bottom-up* » basée sur la **philosophie du « *choice awareness* »** (Lund, 2000; Sperling et al., 2011; Chittum and Østergaard, 2014) garantissant **l'élaboration coordonnée entre tous les acteurs socio-économiques**, les chercheurs et les ingénieurs des plans énergie-climat à partir des échelles communales puis régionales jusqu'à la conclusion à l'échelle nationale des accords énergie-climat entre le Gouvernement et le Parlement (de Larochembert, 2016). Les retours d'expérience de la transition énergétique et climatique du Danemark montrent clairement l'efficacité de la méthodologie qui permet au Danemark de

se hisser en tête des classements européens en matière d'élimination des gaz à effet de serre et de développement massif des énergies renouvelables (Eurostat, 2020). Ils permettent de mieux cerner ses lignes de force et sa capacité à en corriger les faiblesses identifiées, à libérer les contraintes et les freins à son mise en œuvre, et à améliorer en permanence son efficacité (Hvelplund and Djørup, 2019). Des Plans Climat-Energie ont été étendus à la quasi-totalité des Communes (Kommuner) du Danemark, qui ont mis en place un Compte climatique municipal ou un compte climatique géographique (selon l'étendue rurale de la Commune) universel couvrant les domaines de l'énergie et des bâtiments, des transports et mobilités, de l'agriculture et de l'utilisation des terres, du développement technologique de des affaires, de la gestion de l'entreprise Commune. Ils permettent le suivi détaillé des avancées par secteurs et l'évaluation globale des objectifs climatiques de la Commune et leur amélioration (Concito, 2020; Energiregnskaber, 2020; Klimaregnskaber, 2018). Ils font partie du projet DK2020 lancé par Realdania avec C40 et Concito, et sont entièrement transparents et consultables par tous les citoyens et les chercheurs (De Larochelambert, 2022)

Au regard de ce contexte, différents enjeux scientifiques peuvent être cités, parmi eux :

- **Faire le bilan des méthodologies de planification énergie-climat et déterminer parmi elles celles qui sont les plus efficaces**, qui montrent des résultats probants, et qui pourraient être testées sur une communauté de communes française. Mettre en avant les freins mais aussi les leviers d'actions visant le développement massif des énergies renouvelables, une décentralisation énergétique pour un système moins dépendant des énergies fossiles et plus respectueux de l'environnement.
- **Etudier la faisabilité technico-économique de systèmes énergétiques renouvelables intelligents (SERI)** à l'horizon 2030 et 2050 pour atteindre les objectifs de réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre et une meilleure résilience du système. La mise en œuvre des SERI, qui semblent prometteurs, nécessite des données de haute résolution spatiale et temporelle et le déploiement d'outils de programmation et de simulation numérique adaptés.
- **Créer les conditions d'une élaboration des scénarios pertinents, concertés, et acceptés entre les divers acteurs de la société** (chercheurs, associations, bureaux d'études, citoyens, collectifs, collectivités, entreprises, etc.) pour que les données soient compréhensibles et utilisables par tous pour préparer des prospectives sur le long terme. L'inclusion citoyenne dans les prises de décision, ou simplement la mise à disposition transparente de données est un levier important de la transformation de nos sociétés. L'intégration technique mais aussi socio-économique des communautés locales d'énergie (dans lesquelles les consommateurs s'associent pour produire de l'énergie et prendre le nouveau rôle de consom'acteurs de l'énergie) dans le système énergétique au sein d'une collectivité, mêlant production et autoconsommation est aussi des pistes à explorer.

## **2 Description du travail de thèse**

### **2.1 Objectifs scientifiques**

L'objectif général de la thèse est de **développer et tester une nouvelle démarche multi-échelles de planification énergétique, basée sur une description et modélisation fine des systèmes énergétiques, adossée à une concertation territoriale multi-acteurs pour engager la transition énergétique et écologique**. La thèse se focalise sur l'étude des systèmes énergétiques des territoires urbanisés, et de leurs bassins de vie (territoire sur lequel les habitants ont accès aux équipements et services les plus courants, selon la définition de l'INSEE). Le cas d'étude s'intéressera plus spécifiquement à une collectivité de taille moyenne, l'Eurométropole de Strasbourg (France). Plusieurs étapes seront suivies :

- Faire un **bilan des outils et méthodes utilisés pour la planification énergie-climat (Tâche 1)** à l'échelle d'une agglomération / un territoire urbanisé, en lien avec ses territoires environnants (bassin de vie).
- **Etudier dans le détail la méthodologie de la planification énergie-climat d'une collectivité française (Tâche 2)** (Eurométropole de Strasbourg) au regard d'autres collectivités de même importance très avancées en Europe (Danemark prioritairement).

- **Développer un cadre d'analyse socio-économique et technique d'un système énergétique d'un territoire urbanisé (Tâche 3).** La méthodologie EnergyPLAN, qui intègre les SERI, développée au Danemark sera adaptée sur le territoire de la région Eurométropole de Strasbourg, avec l'ensemble des acteurs en présence.
- **Tester des méthodes de concertation** autour des données issues de la méthodologie EnergyPLAN pour mieux identifier les freins et les opportunités d'une nouvelle démarche de concertation multi-acteurs (**Tâche 4**).

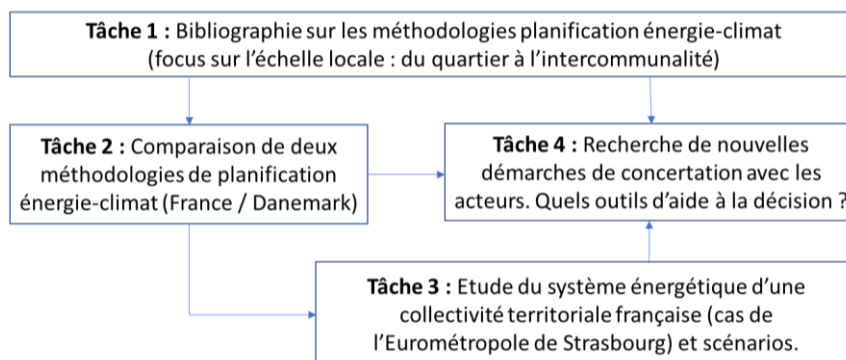


Figure 1 : Schéma adopté pour le développement d'une méthodologie concertée de planification énergie-climat.

Ce travail répond prioritairement à l'**axe 3.3.1 Gestion de la flexibilité via des approches multi-vecteurs énergétiques**. Il s'agit d'étudier les transformations structurelles et fonctionnelles à apporter à un système énergétique local pour l'optimiser en conformité aux objectifs énergétiques et climatiques, *via* le couplage intersectoriel entre les différents réseaux et stockages d'énergies, les mobilités. Ce travail apportera un éclairage sur la possibilité de faire face aux problématiques de stockage de l'énergie, de flexibilité du réseau vis-à-vis de la demande et de la production, dans un objectif d'efficacité economico-énergétique et de résilience technique du système. Il répond aussi à l'**axe 4.4.6 Apports de la prospective à la planification et au pilotage de la transition écologique**. Il s'agira d'étudier autour des données produites la concertation mais aussi les prises de décisions entre les différents acteurs (des élus, des services publics aux citoyens en passant par les gestionnaires de réseaux, les producteurs d'énergie, les entreprises, les associations, les agriculteurs, les formateurs, la recherche et l'université, etc.) à différentes échelles, du quartier (voire bâtiment) au niveau intercommunal (voire régional ou national). Par sa démarche holistique, le projet apportera des éclairages à l'**axe 4.3.1 Politiques de transition écologique**, notamment en analysant les **articulations entre différents acteurs de l'action publique** (échanges, interdépendances) nécessaires entre la collectivité urbaine visée (Eurométropole Strasbourg) et les territoires limitrophes (bassin de vie, département), ainsi que les échelles nationales (la France et l'Allemagne) et européenne pour une meilleure **territorialisation des actions et initiatives locales**.

## 2.2 Positionnement par rapport à l'état de l'art

Il est aujourd'hui établi que les systèmes énergétiques centralisés massivement construits sur les énergies fossiles génèrent de multiples conséquences tant locales que planétaires : inégalités humaines, les dettes extérieures, dégradations environnementales, sociales et sanitaires considérables (Hiremath et al., 2007). Les **systèmes décentralisés** sont, quant à eux, souvent associés à un développement important des énergies renouvelables locales (hormis les grands barrages hydroélectriques) et à la diminution des émissions de gaz à effet de serre (Bauknecht et al., 2020). Ces systèmes **apparaissent même comme nécessaires dans l'atteinte des objectifs 100% renouvelables** (Sperling et al., 2011; Hansen et al., 2019; Hvelplund, 2013). Ils apportent de nombreux bénéfices (Rallo et al., 2022; Sun et al., 2023) et rendent les systèmes énergétiques pleinement opérationnels, rentables et efficaces (Bauknecht et al., 2020; Li and Zhang, 2021). Au-delà des aspects techniques, économiques et environnementaux, ils représentent une avancée sociale à court et moyen termes : la



participation, l'implication citoyenne, les emplois et l'accès à l'énergie sont d'autant d'aspects qu'un système décentralisé favorise (Bauknecht et al., 2020; Thapar, 2022).

Economidou et al., (2022) ont analysé l'efficacité des mesures politiques prises en matière énergétique en Europe de 2007 à 2020. Ils concluent que la scénarisation des objectifs intermédiaires ainsi que des mesures de suivi et de vérification sont autant de pratiques et de mesures qui favorisent l'achèvement des objectifs énergétiques et climatiques. Zell-Ziegler et al. (2021) expliquent que les notions de « sobriété » et « suffisance » (*sufficiency*) commencent à être intégrées dans les plans : elles réfèrent alors majoritairement à des comportements individuels, et peu à une transformation structurelle plus large, multi-échelles et multi-sectorielle des systèmes énergétiques.

**La méthodologie de planification énergétique du Danemark a été très intensivement analysée**, disséquée, théorisée et modélisée dans la littérature scientifique, non seulement par son efficacité mais aussi par l'association étroite des chercheurs et citoyens danois au processus de planification démocratique mis en œuvre, tant aux échelles locales que nationale (Hvelplund et al., 2013; Hvelplund and Djørup, 2019; Lund, 2010; Lund and Mathiesen, 2009; Menu, 2021; Parajuli, 2012). Ces études soulignent l'importance de l'acceptabilité et de la participation active des citoyens et des collectivités locales dans les orientations des investissements énergétiques vers un système 100% renouvelable, devenu objectif national consensuel. **Les étapes successives d'élimination des énergies fossiles, depuis l'installation massive des unités de cogénération, des réseaux de chaleur et des parcs éoliens jusqu'aux réseaux intelligents et leur migration vers les SERI** beaucoup plus efficaces et soutenables, ont été initiées et validées par les chercheurs danois en modélisant et en simulant numériquement (avec EnergyPLAN) chaque pas en étroite collaboration et compétition avec les représentations démocratiques danoises (communes, régions, parlement), organismes publics (Agence danoise de l'énergie, Energinet.dk), associations professionnelles (association d'ingénieurs IDA) (Lund et al., 2017, 2016, 2014, 2012; Mathiesen et al., 2015).

En France, malgré l'émergence d'initiatives locales (Sebi and Vernay, 2020) et les possibilités de flexibilité offertes (Després et al., 2017), les différences notables entre la représentation du local et la réalité institutionnelle française font obstacle à la décentralisation et interrogent les stratégies de pénétration des EnR électriques variables (Shirizadeh and Quirion, 2021). La transition du système électrique français vers un mix plus renouvelable, voire 100% renouvelable, est souvent étudiée en laissant à la marge ses interactions possibles avec le reste des vecteurs énergétiques (RTE, 2021; Shirizadeh et al., 2019). Pourtant la modélisation des systèmes énergétiques 100% renouvelables couplés avec stockage est depuis bien longtemps abordée aux échelles locales et nationale (De Larochelambert, 1983). Elle n'a repris de la vigueur en France que très récemment. En particulier, les couplages multisectoriels, leur optimisation, leur modélisation temporelle fine commencent à être investis par les chercheurs (NégaWatt, 2011 ; ANCRE, 2017 ; NégaWatt, 2022; Shirizadeh and Quirion, 2022) et à être prises en compte par les institutions (ADEME, 2021, 2015).

La planification énergétique fait intervenir **un nombre important d'acteurs et d'échelles**. Parmi eux, **l'intercommunalité est révélée comme un niveau important de la planification énergétique à l'échelle territoriale et locale** (Brandoni and Polonara, 2012; Gustafsson et al., 2015). En France, et même si le système énergétique se montre comme un système centralisé, les EPCI (établissement public de coopération intercommunale) se voient attribuées de plus en plus de compétences, et font donc partie intégrante d'un niveau d'action de transition écologique et énergétique, en particulier dans le développement des énergies renouvelables (Perrin and Bouisset, 2022). Au Danemark, la création des Plans Climat-Energie a été étendue à la quasi-totalité des Communes (Kommuner) qui ont mis en place **un Compte climatique municipal** ou un compte climatique géographique (selon l'étendue rurale de la Commune). Ce dernier est **homogénéisé nationalement** et couvre les domaines de l'énergie et des bâtiments, des transports et mobilités, de l'agriculture et de l'utilisation des terres, du développement technologique de des affaires, de la gestion de l'entreprise Commune. Certaines études portent leur attention sur la nécessité de l'intégration des citoyens dans les décisions (Gustafsson et al., 2015; Sperling et al., 2011).

L'Europe, par la directive du parlement européen et du conseil de 2018 révisée en 2021 en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, donne un

tremplin aux communautés d'énergie (Comission Européenne, 2021; Soeiro and Ferreira Dias, 2020). Aussi les initiatives communautaires sont en croissance (Koirala et al., 2016). Elles favorisent le développement d'énergies renouvelables à l'échelle locale et communautaire (Pons-Seres de Brauwer and Cohen, 2020) et questionnent leur intégration dans un système énergétique plus global (Koirala et al., 2016; Wierling et al., 2021).

Enfin, de **nombreux outils de modélisation informatique de planification de systèmes énergétiques et d'aide à la décision existent** (Connolly et al., 2010) et se distinguent par les fonctionnalités, les pas de temps, les champs d'application, les aptitudes à intégrer les EnR variables et à coupler les réseaux énergétiques, à optimiser techniquement/économiquement les systèmes, à intégrer les analyses de coûts, de pollution, d'émissions de GES. On peut distinguer les évaluations globales type ACV (Björklund, 2012), les analyses critérielles (Pohekar & Ramachandran, 2004) ou encore tous les modèles de planification énergétique dits Energy planning Models (EPMs) (Debnath and Mourshed, 2018). Parmi les EPMs, les plus utilisés internationalement, le programme EnergyPLAN se distingue clairement par le nombre des applications internationales, sa versatilité, sa capacité d'intégrer les secteurs et les vecteurs énergétiques, les EnR en toutes proportions, à simuler les systèmes en les optimisant sur des critères techniques (équilibre des réseaux électriques, des productions-consommations de chaleur) et/ou de coûts. Il est un des rares à pouvoir prendre en compte tous les systèmes modernes de stockages, de production et d'utilisation impliqués dans les SERI beaucoup plus efficaces et soutenables (Østergaard, 2015). La validation importante d'EnergyPLAN par les planifications locales, nationales et continentales au cours des deux dernières décennies en font un outil performant de choix pour l'élaboration de simulation/optimisation de scénarios énergie-climat réalistes et prédictifs (Lund et al., 2017 ; Østergaard et al., 2022).

## 2.3 Approche / Méthodologie

### 2.3.1 Tâche1 : Analyse des outils et méthodes de la planification énergie-climat

Ce volet consistera à mener une analyse bibliographique sur la planification énergie-climat à l'échelle internationale. Il s'agira d'analyser les choix de planification énergie-climat (interaction et cohérence entre échelles de planification locale-nationale-européenne), les outils (bases de données, outils informatiques de gestion et de suivi de planification, logiciels de planification : accessibilité, transparence, complétude, efficacité) et méthodologies (modalités, lieux, formation et intégration des parties prenantes, suivi et analyse, ajustement par essais-erreurs) pour l'organiser. Le livrable de cette phase sera :

- Un bilan technique et sociologique des méthodes de planification énergie-climat, de leurs résultats, et des freins et leviers identifiés à la planification à l'échelle communale.

### 2.3.2 Tâche 2 - Étude comparée de deux méthodologies de planification énergie-climat de deux collectivités en Europe (France - FR / Danemark - DK)

L'hypothèse est faite que la méthodologie de planification énergie-climat choisie peut beaucoup influencer les choix des infrastructures à limiter, maintenir et développer. Du point de vue purement technique et théorique, les synergies électricité / gaz / réseaux de chaleur doivent être exploitées. Or pour pouvoir être étudiées et optimisées, en associant flexibilité, effacement, efficacité énergétique avec la demande des usagers, il faut pouvoir s'appuyer sur des bases de données très précises qui doivent être actualisées et maintenues sur des temps longs pour entrer dans une démarche de prospective sur le long-terme.

Du point de vue de la mise en pratique de concepts théoriques, les réalités socio-économiques et de la planification urbaine sont forcément à prendre en considération, et la concertation des acteurs concernés doit être organisée pour favoriser la co-construction de projets prospectifs et ainsi favoriser leur acceptabilité sociale et intégration territoriale.

Nous proposons ici de faire un état des lieux des initiatives, des méthodologies, des outils et approches partant des données, qui sont mobilisés sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) pour planifier et piloter de la transition énergie-climat (À quelles échelles la

planification énergie-climat s'organise-t-elle - quartier, commune, intercommunalité, région, nation, quelles sont les parties prenantes ? Leur organisation et articulation ? Quelles données sont mobilisées pour planifier les stratégies énergie-climat ?)

La démarche sera comparée à la méthodologie danoise dont la mise en œuvre sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg sera aussi étudiée. Les communes danoises s'appuient sur des bases de données très détaillées, ouvertes, homogénéisées, pérennes, pour être exploitées ensuite en entrée d'outils de planification énergétiques tels que EnergyPLAN. La mise en pratique d'une telle démarche permettra d'analyser les opportunités et les freins existants en France pour engager l'ensemble d'un territoire dans une prospective de long-terme vers la sobriété et la neutralité carbone. Les travaux bénéficieront sûrement des divers « outils » présents sur le territoire, comme le Conseil de développement (CoDev) de l'Eurométropole de Strasbourg, l'instance de participation citoyenne indépendante, qui a été créé en 2015, pour favoriser le dialogue et la participation citoyenne à l'échelle de l'agglomération, avec ses six commissions permanentes thématiques (Aménagement-Cadre de vie, Mobilités, Service publics du quotidien, Économie-Emploi-développement, Bien vivre dans l'Eurométropole, Énergie créée en juin 2022). La commission énergie doit apporter son expertise sur le volet de la sobriété et de l'efficacité énergétique, et également sur l'acceptabilité des solutions d'énergies renouvelables et locales envisagées dans le mix énergétique futur.

Le livrable de cette phase seront :

- Une analyse comparée des méthodologies planification énergie-climat FR/DK
- Une identification des freins et opportunités de bases de données énergie-climat partagée.

### 2.3.3 Tâche 3 - Analyse technique et économique de la structure et du fonctionnement d'un système énergétique

La simulation fine et pertinente des systèmes énergétiques renouvelables intelligents (SERI) complexes et étendus, des échelles locales à nationales, requiert le couplage de bases de données énergie-climat (BDEC) fonctionnelles et pérennes de résolutions spatiales et temporelles suffisantes sur le territoire étudié (quartiers, communes, département, France) avec des outils de planification énergétique. Dans le cadre de cette thèse, le modèle EnergyPLAN qui intègre les SERI, sera mobilisé pour exemple. Il permet de générer des simulations pluriannuelles fines à résolution temporaire courte (1 heure) et à maillage spatial dense (échelle des installations dans les communes) de l'évolution d'un système local (quartiers, métropole) pendant sa transition du système actuel vers le SERI. Son application sur l'EMS permettra de déterminer dans quelle mesure le couplage local de l'ensemble des réseaux d'électricité, de chaleur, de froid, de gaz et de mobilité, entre eux et avec les stockages énergétiques locaux correspondants, permet un accroissement d'efficacité énergétique, une économie d'investissements et de consommations énergétiques grâce à un dimensionnement spatial et temporel adéquat des stockages par rapport aux réseaux énergétiques intelligents locaux, intégrant toutes les flexibilités du côté consommateurs et du côté producteurs, ainsi qu'une réduction des émissions des gaz à effet de serre. Il s'agira de **conduire des analyses** à partir de simulations sans et avec optimisation technique/économique, à différentes échelles pour **illustrer l'importance des périmètres d'étude dans les dimensionnements et les architectures des systèmes énergétiques en partant du local vers le global** ; et de produire des **scénarios de transition énergie-climat pluriannuels** de l'Eurométropole de Strasbourg en modélisant les effets énergétiques et économiques structurants des stockages énergétiques locaux sur l'efficacité et le dimensionnement des réseaux énergétiques locaux d'une part, et sur les consommations, les flux énergétiques internes et externes de la collectivité d'autre part. Diverses trajectoires énergétiques, économiques et écologiques 2030 et 2050 pourront être explorées en lien avec les acteurs.

Les livrables de cette phase seront :

- **une base de données structurée**, exhaustive, dynamique et pérenne sur la demande, la production énergétique, les transports, les structures sectorielles (habitat individuel, collectif, bâtiments publics, privés, industriels, tertiaires), les équipements et structures énergétiques (réseaux de chaleur, pompes à chaleur, réfrigérateurs, congélateurs,

types et caractéristiques des chauffages, climatisations, réseaux de chaleur, de froid, d'électricité, de gaz) et les potentiels énergétiques renouvelables ;

- **l'élaboration et quantification d'hypothèses de transition énergétique et socio-économique** à l'horizon 2030 et 2050, sans et avec changement de structure selon le degré de couplage intersectoriel des réseaux d'énergie et de stockage multi-échelles et multi-énergie et le taux de couverture énergétique renouvelable ;
- **des évaluations de stratégies d'investissement, de transformations structurelles, d'aménagement, de modes de gouvernance, de politique socio-économique** pouvant être mises en œuvre sur le territoire. Ces évaluations devront porter sur les efficacités énergétiques (énergies finales/primaires), les montants et taux par habitant des investissements, les baisses d'émissions de GES, les créations/suppressions d'emplois, les temps de retour énergétique, les retours sur investissement, et mettre en regard les plans de formation nécessaires.

#### 2.3.4 **Tâche 4 : Outil à la décision intégrant la prospective à la planification et à la transition énergétique et écologique**

Les résultats des tâches 2 (mise en place d'une base de données énergie-climat détaillée et partagée) et 3 (simulation du système énergétique complet et scénarios) permettront d'engager plusieurs actions **en lien avec les acteurs du territoire**. Les difficultés, freins, blocages rencontrés pour la structuration de la base de données (résultats de la tâche 2), la construction des données manquantes et des scénarios, et analyser les opportunités offertes par un outil partagé et transparent de la planification énergie-climat seront discutées. Les choix déjà opérés par les acteurs dans leur stratégie énergie-climat seront analysés au regard des résultats de la méthodologie développée pendant la thèse. L'utilisation des scénarios (résultats de la tâche 3) seront envisagés avec les acteurs pour réorienter si nécessaire leurs décisions. Les difficultés, freins, blocages rencontrés seront collectés. Sur la base des résultats et des discussions, un système d'indicateurs de suivi des planifications énergie-climat sera mis en place. Il s'agit donc dans cette tâche de présenter les divers résultats obtenus aux divers acteurs, et d'envisager avec eux une stratégie basée sur une prospective de long terme dans chacun des secteurs essentiels à une transition énergie-climat réussie (production d'énergie – multi-vecteurs, transport, résidentiel, etc.). L'articulation et le dialogue entre les diverses échelles de prospective et de planification énergie-climat (quartier, (inter)communale, régionale et européenne) seront à étudier pour apporter dans la méthodologie les moyens de coordonner l'action publique de la planification dans toutes ses dimensions.

Les livrables de cette phase seront :

- **une nouvelle méthodologie planification énergie-climat** transposable à d'autres municipalités, métropoles, groupements de communes ;
- **un retour d'expérience sur un cas concret** : une analyse des freins et opportunités de sa mise en place au sein d'une municipalité ;
- **des recommandations pour des outils d'aide à la décision et de suivi des politiques territoriales.**



## 2.4 Programme / échéancier prévisionnel

Tâches / mois	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
<b>Tâche 1 : Analyse des méthodes de la planification énergie-climat</b>																		
1.1 Base de données et outils d'aide à la décision																		
1.2 Concertation																		
1.3 Publication			L															
<b>Tâche 2 : Étude comparée (France / Danemark)</b>																		
2.1 Base de données et outils d'aide à la décision																		
2.2 Concertation																		
2.3 Publication						L												
<b>Tâche 3 : Analyse du système énergétique de l'EMS</b>																		
3.1 Création d'une base de données																		
3.2 Modélisation / Sensibilité																		
3.3 Scénarios SERI																		
<b>Tâche 4 : Concertation avec les acteurs</b>																		
4.1 Frein et opportunités BdB partagée					L													
4.2 Quels scénarios ?										L								
4.3 Quelle prospective ?																	L	
<b>Ecriture de la thèse</b>			R			R			R			R				R		L

## 2.5 Moyens consacrés / Collaborations envisagées

### Moyens humains : expertises de l'équipe encadrante

Le projet met en relation des chercheurs du groupe de recherche « Energie, Pollution de l'Air et Climat » (EPAC) du laboratoire de recherche Image Ville Environnement (LIVE) et un chercheur du département Energie du laboratoire FEMTO-ST, dont les compétences sont complémentaires. **Le groupe EPAC** est un groupe pluri-disciplinaire (parmi les permanents, principalement des physicien-chimistes) au sein de la géographie, qui développe depuis des années des outils de modélisation dont l'objectif est d'aider à l'évaluation des stratégies de réduction de la pollution de l'air. Les stratégies de sobriété et d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre font l'objet de l'attention du groupe. Un nouveau modèle de planification énergie, REPM (Regional Energy Planning Model) est développé (Thèse EPFL de Jessie Madrazzo<sup>1</sup> ; Thèse de Marco Guevara<sup>2</sup> ; Projet Interreg RES-TMO<sup>3</sup>, 120k€ EPAC ; Projet Fonds de dotation Air TECA<sup>4</sup>, 100k€ EPAC). Le modèle EnergiePLAN est testé en parallèle dans le cadre du projet OHM Fessenheim ESTEES<sup>5</sup> (7.5k€), mené en collaboration avec Dr. T. de Laroche Lambert et l'Université de Aalborg (Danemark) pour détailler les systèmes énergétiques à l'échelle d'un quartier ou d'une agglomération et ainsi prendre en compte l'ensemble des vecteurs d'énergie et des structures possibles pour favoriser la flexibilité, la sobriété/efficacité et axer le territoire étudié vers la neutralité carbone. Le groupe EPAC a aussi engagé des recherches exploratoires sur l'analyse des méthodologies de planification énergie-climat (stage de master 1 ; projet « Cellule Energie CNRS » COMET-PLANET<sup>6</sup>, 7.5k€), les communautés d'énergie et l'acceptabilité des nouvelles techniques technologies

<sup>1</sup> Thèse Jessie Madrazzo, 2018, Alternative Methods for Assessing Air Quality and Energy Strategies for Developing Countries: A Case Study on Cuba. Disponible : <https://infoscience.epfl.ch/record/261332>

<sup>2</sup> Thèse Marco Guevara, 2023, Développement d'une méthodologie permettant de concevoir différentes stratégies énergétiques et d'analyser leurs impacts sur le changement climatique et la qualité de l'air. En cours.

<sup>3</sup> Projet Interreg RES-TMO (2019-2022) « Concepts régionaux pour un approvisionnement et un stockage d'énergie intégrés, efficaces et durables dans la Région Métropolitaine Trinationale du Rhin Supérieur (RMT) - RES\_TMO ». Coordinateur : Université de Freiburg. EPAC : 150k€.

<sup>4</sup> Projet Fonds de dotation AIR TECA (2020-2023) « Développement d'un outil d'aide à la décision pour la définition de stratégies énergétiques, climat et qualité de l'air ». Coordinateur : CNRS (LIVE). EPAC : 85k€.

<sup>5</sup> Projet exploratoire OHM Fessenheim ESTEES (2022-2023). Coordinateur : CNRS (LIVE & FEMTO-ST). EPAC : 7.5k€.

<sup>6</sup> Projet exploratoire Cellule Energie CNRS COMET-PLANET (2023) « Comparaison des Méthodologies de PLANification Energétique ». Coordinateur : CNRS (LIVE & FEMTO-ST). EPAC : 14k€.

telles que le V2G (Projet Seed-Money<sup>7</sup> en collaboration avec le Karlsruhe Institute of Technology). Ces projets exploratoires viennent en préparation du développement plus général d'un outil de concertation sur la planification énergie-climat-qualité de l'air, auquel cette thèse contribuera.

**Le département Energie du laboratoire FEMTO-ST** travaille de son côté à la mise au point des dispositifs et systèmes énergétiques de production et de stockage, à la modélisation et l'optimisation de systèmes de conversion énergétique, de smartgrids, et à la modélisation des planifications énergétiques. Parmi les modèles utilisés, le modèle EnergyPLAN, développé par l'Université d'Aalborg (Danemark) permet de tester les différentes hypothèses de structures de productions-stockages-couplages-consommations ou rechercher un optimum technique ou économique selon les choix de l'utilisateur. Il simule le fonctionnement de ces systèmes aussi heure par heure en y incluant toutes les formes de stockages (y compris les véhicules électriques en V2G, les STEP, le biométhane, l'hydrogène, l'air comprimé, les cuves et puits thermiques, etc.) et les échanges extérieurs sur les marchés de l'électricité et de gaz, les analyses complètes de coûts. Il permet également d'étudier les émissions de GES associées (y compris avec capture-stockage du CO<sub>2</sub>).

### **Collaborations engagées :**

**L'Université d'Aalborg** est impliqué dans le stage de master du futur doctorant pour aider à optimiser l'application de EnergyPLAN, également pour comprendre et bien appliquer la méthodologie de concertation développée à l'échelle communale au Danemark. **Le KIT-IIP** aide à analyser les avancées technologiques, le marché économique, et à étudier le rôle que les **communautés d'énergie** jouent dans les systèmes énergétiques. Le Laboratoire IRIMAS de l'Université de Haute-Alsace apporte son expertise sur la sécurité des réseaux. **L'Eurométropole de Strasbourg (EMS)** soutiendra la thèse concernant la collecte de données, l'analyse le système énergétique de l'EMS, produire les scénarios de prospectives énergie-climat, et mettre en place une méthodologie de concertation basée sur les données produites.

### **Gestion RH et moyens techniques :**

Le Laboratoire Image Ville Environnement s'engage à assurer les ressources gestionnaires humaines et à mettre à disposition les moyens techniques nécessaires pour le bon déroulement du projet de thèse. Le doctorant aura ainsi accès à un bureau dédié à son travail, un ordinateur de bureau et les outils informatiques nécessaires (accès au méso-centre de calcul de Strasbourg si nécessaire – a priori pas). Il aura aussi la possibilité de participer aux activités régulières du laboratoire : réunions des doctorants, réunions de laboratoire, conseil du laboratoire, etc. Il bénéficiera des formations organisées par le laboratoire, l'école doctorale, et aura accès à des offres de formation par le CNRS et l'Université de Strasbourg. Certaines formations sont obligatoires, d'autres à choisir. Il pourra également se déplacer à des conférences pour faire connaître ses recherches. Le groupe EPAC su LIVE s'engage à fournir ainsi les crédits pour ses missions. Le doctorant aura la possibilité de diffuser ses connaissances à travers ses réunions avec les acteurs académiques et non-académiques. Il pourra, s'il le souhaite, intervenir dans les enseignements.

## **2.6 Bibliographie sélective**

ADEME, 2021. Ademe -Transitions2050 (2021).

ADEME, 2015. Ademe Mix électrique - Rapport final (2015).

AIE, 2023. Fossil Fuels Consumption Subsidies 2022. Paris.

Al kez, D., Foley, A.M., McIlwaine, N., Morrow, D.J., Hayes, B.P., Zehir, M.A., Mehigan, L., Papari, B., Edrington, C.S., Baran, M., 2020. A critical evaluation of grid stability and codes, energy storage and smart loads in power systems with wind generation. *Energy* 205, 117671. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117671>

Bauknecht, D., Funcke, S., Vogel, M., 2020. Is small beautiful? A framework for assessing decentralised electricity systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 118, 109543. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109543>

Björklund, A., 2012. Life cycle assessment as an analytical tool in strategic environmental assessment. Lessons learned from a case study on municipal energy planning in Sweden. *Environ. Impact Assess. Rev.* 32, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.ear.2011.04.001>

---

<sup>7</sup> Projet exploratoire Seed-Money (2022-2023) « Interdisciplinary student research lab in the Upper Rhine Region : Can communities foster participation in V2G? A comparison of different community forms and across countries ? ». Coordinateur : KIT. LIVE : 8kE.

- Brandoni, C., Polonara, F., 2012. The role of municipal energy planning in the regional energy-planning process. *Energy* 48, 323–338. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.061>
- Chittum, A., Østergaard, P.A., 2014. How Danish communal heat planning empowers municipalities and benefits individual consumers. *Energy Policy* 74, 465–474. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.001>
- Commission Européenne, 2021. Directive du parlement européen et du conseil modifiant la directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil, le règlement (UE) 2018/1999 du Parlement européen et du Conseil et la directive 98/70/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et abrogeant la directive (UE) 2015/652 du Conseil.
- Concito, 2020. Klimaplanlægning i kommunerne. Status for danske kommuners forebyggende klimaplanlægning. Concito, februar 2020.
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V., Leahy, M., 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Appl. Energy* 87, 1059–1082. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>
- De Laroche Lambert, T., 2022. Conférence OHM Fessenheim : Méthodologie scientifique et philosophie de la planification énergétique. Retours d'expérience du Danemark.
- de Laroche Lambert, T., 2016. La transition énergétique du Danemark : un modèle de planification démocratique européen.
- De Laroche Lambert, T., 1983. Les énergies de l'Alsace – Projet Alter.
- Debnath, K.B., Mourshed, M., 2018. Forecasting methods in energy planning models. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 88, 297–325. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.002>
- Després, J., Mima, S., Kitous, A., Criqui, P., Hadjsaid, N., Noirot, I., 2017. Storage as a flexibility option in power systems with high shares of variable renewable energy sources: a POLES-based analysis. *Energy Econ.* 64, 638–650. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.03.006>
- Economidou, M., Ringel, M., Valentova, M., Castellazzi, L., Zancanella, P., Zangheri, P., Serrenho, T., Paci, D., Bertoldi, P., 2022. Strategic energy and climate policy planning: Lessons learned from European energy efficiency policies. *Energy Policy* 171, 113225. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113225>
- Energiregnskaber, 2020. Energiregnskaber 2020.
- Eurostat, 2020. Eurostat 2020.
- Foley, A.M., Leahy, P.G., Marvuglia, A., McKeogh, E.J., 2012. Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renew. Energy* 37, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.033>
- Gustafsson, S., Ivner, J., Palm, J., 2015. Management and stakeholder participation in local strategic energy planning – Examples from Sweden. *J. Clean. Prod.* 98, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.014>
- Hansen, K., Mathiesen, B.V., Skov, I.R., 2019. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 102, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.038>
- Hiremath, R.B., Shikha, S., Ravindranath, N.H., 2007. Decentralized energy planning; modeling and application—a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11, 729–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.005>
- Hvelplund, F., Djørup, S., 2019. Consumer ownership, natural monopolies and transition to 100% renewable energy systems. *Energy* 181, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.058>
- Hvelplund, F., Möller, B., Sperling, K., 2013. Local ownership, smart energy systems and better wind power economy. *Energy Strategy Rev.* 1, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2013.02.001>
- Klimaregnskaber, 2018. Klimaregnskaber 2018.
- Koirala, B.P., Koliou, E., Friege, J., Hakvoort, R.A., Herder, P.M., 2016. Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56, 722–744. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.080>
- Laroche Lambert, T.D., 2023. Le coupage intersectoriel intégré au cœur des Systèmes Énergétiques Renouvelables Intelligents.
- Li, L., Zhang, S., 2021. Techno-economic and environmental assessment of multiple distributed energy systems coordination under centralized and decentralized framework. *Sustain. Cities Soc.* 72, 103076. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103076>
- Lund, H., 2010. *Renewable energy systems: the choice and modeling of 100% renewable solutions*. Elsevier/AP, Amsterdam ; Boston.
- Lund, H., 2000. Choice awareness: the development of technological and institutional choice in the public debate of Danish energy planning. *J. Environ. Policy Plan.* 2, 249–259. [https://doi.org/10.1002/1522-7200\(200007/09\)2:3<249::AID-JEPP50>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1522-7200(200007/09)2:3<249::AID-JEPP50>3.0.CO;2-Z)
- Lund, H., Andersen, A.N., Østergaard, P.A., Mathiesen, B.V., Connolly, D., 2012. From electricity smart grids to smart energy systems – A market operation based approach and understanding. *Energy* 42, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.003>
- Lund, H., Arler, F., Østergaard, P., Hvelplund, F., Connolly, D., Mathiesen, B., Karnøe, P., 2017. Simulation versus Optimisation: Theoretical Positions in Energy System Modelling. *Energies* 10, 840. <https://doi.org/10.3390/en10070840>
- Lund, H., Mathiesen, B.V., 2009. Energy system analysis of 100% renewable energy systems—The case of Denmark in years 2030 and 2050. *Energy* 34, 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.04.003>
- Lund, H., Østergaard, P.A., Connolly, D., Ridjan, I., Mathiesen, B.V., Hvelplund, F., Thellufsen, J.Z., Sorknæs, P., 2016. Energy Storage and Smart Energy Systems. *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.* 3-14 Pages. <https://doi.org/10.5278/IJSEPM.2016.11.2>
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J.E., Hvelplund, F., Mathiesen, B.V., 2014. 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy* 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

- Mathiesen, B.V., Lund, H., Connolly, D., Wenzel, H., Østergaard, P.A., Möller, B., Nielsen, S., Ridjan, I., Karnøe, P., Sperlind, K., Hvelplund, F.K., 2015. Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Appl. Energy* 145, 139–154. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075>
- Menu, T., 2021. Denmark: A Case Study for a Climate-Neutral Europe.
- Ministère de la transition énergétique, 2022. Chiffres clés du climat, décembre 2022.
- Ministère de la transition énergétique, 2020. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2020. Ministère de la transition énergétique.
- Mukherji, A., Thorne, P., Cheung, W.W.L., Connors, S.L., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Simpson, N.P., Totin, E., Blok, K., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hermans, T., Ley, D., Lewis, J., Nicholls, Z., Niamir, L., Szopa, S., Trewin, B., Howden, M., Méndez, C., Pereira, J., Pichs, R., Rose, S.K., Saheb, Y., Sánchez, R., Xiao, C., Yassaa, N., 2023. SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6).
- Nadaï, A., Labussière, O., Debourdeau, A., Régnier, Y., Cointe, B., Dobigny, L., 2015. French policy localism: Surfing on 'Positive Energie Territories' (Tepos). *Energy Policy* 78, 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.005>
- NégaWatt, 2022. Synthèse du scénario négaWatt 2022.
- ONU, 2015. Accord de Paris.
- Østergaard, P.A., 2015. Reviewing EnergyPLAN simulations and performance indicator applications in EnergyPLAN simulations. *Appl. Energy* 154, 921–933. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.086>
- Østergaard, P.A., Lund, H., Thellufsen, J.Z., Sorknæs, P., Mathiesen, B.V., 2022. Review and validation of EnergyPLAN. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 168, 112724. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112724>
- Parajuli, R., 2012. Looking into the Danish energy system: Lesson to be learned by other communities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2191–2199. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.045>
- Perrin, J.-A., Bouisset, C., 2022. Emerging local public action in renewable energy production. Discussion of the territorial dimension of the energy transition based on the cases of four intermunicipal cooperation entities in France. *Energy Policy* 168, 113143. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113143>
- Pons-Seres de Brauwier, C., Cohen, J.J., 2020. Analysing the potential of citizen-financed community renewable energy to drive Europe's low-carbon energy transition. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 133, 110300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110300>
- Poupeau, F.-M., 2020. Everything must change in order to stay as it is. The impossible decentralization of the electricity sector in France. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 120, 109597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109597>
- Rallo, H., Sánchez, A., Canals, L., Amante, B., 2022. Battery dismantling centre in Europe: A centralized vs decentralized analysis. *Resour. Conserv. Recycl. Adv.* 15, 200087. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200087>
- RTE, 2021. Futurs énergétiques 2050 - Principaux résultats.
- Sebi, C., Vernay, A.-L., 2020. Community renewable energy in France: The state of development and the way forward. *Energy Policy* 147, 111874. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111874>
- Shirizadeh, B., Perrier, Q., Qurion, P., 2019. How sensitive are optimal fully renewable power systems to technology cost uncertainty?
- Shirizadeh, B., Quirion, P., 2022. Do multi-sector energy system optimization models need hourly temporal resolution? A case study with an investment and dispatch model applied to France. *Appl. Energy* 305, 117951. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117951>
- Shirizadeh, B., Quirion, P., 2021. Low-carbon options for the French power sector: What role for renewables, nuclear energy and carbon capture and storage? *Energy Econ.* 95, 105004. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105004>
- Soeiro, S., Ferreira Dias, M., 2020. Renewable energy community and the European energy market: main motivations. *Heliyon* 6, e04511. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04511>
- Sperlind, K., Hvelplund, F., Mathiesen, B.V., 2011. Centralisation and decentralisation in strategic municipal energy planning in Denmark. *Energy Policy* 39, 1338–1351. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.006>
- Sun, Y., Gao, P., Razaq, A., 2023. How does fiscal decentralization lead to renewable energy transition and a sustainable environment? Evidence from highly decentralized economies. *Renew. Energy* 206, 1064–1074. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.069>
- Thapar, S., 2022. Centralized vs decentralized solar: A comparison study (India). *Renew. Energy* 194, 687–704. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.117>
- Wierling, A., Zeiss, J.P., Lupi, V., Candelise, C., Sciallo, A., Schwanitz, V.J., 2021. The Contribution of Energy Communities to the Upscaling of Photovoltaics in Germany and Italy. *Energies* 14, 2258. <https://doi.org/10.3390/en14082258>
- Zell-Ziegler, C., Thema, J., Best, B., Wiese, F., Lage, J., Schmidt, A., Toulouse, E., Stagl, S., 2021. Enough? The role of sufficiency in European energy and climate plans. *Energy Policy* 157, 112483. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112483>