

Impact des structures des Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI) sur le bilan et l'efficacité des transitions énergie-climat locales

Thierry de LAROCHELAMBERT^{1*}

¹ Université Marie et Louis Pasteur, Institut FEMTO-ST, CNRS, F-25000 Besançon, France

* (auteur correspondant : thierry.larochelambert@femto-st.fr)

Résumé - Cet article analyse les flux d'énergie et le rôle important de la chaleur au sein d'un SERI local selon les types de couplages intersectoriels, à répartition donnée des besoins énergétiques actuels ou futurs. Il montre l'impact des choix structurels sur l'efficacité du système et les productions primaires de chaleur, électricité, bioénergies nécessaires. Les résultats des simulations horaires et annuelles du système énergétique d'un département français évoluant vers un SERI par transformations systémiques successives sont discutés, avec le levier de la chaleur pour l'efficacité et la décarbonation.

1. Introduction

Les Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI) s'imposent de plus en plus comme solutions pertinentes aux défis climatiques et géopolitiques actuels et futurs, comme à la fragilisation croissante et à l'inefficacité des systèmes énergétiques classiques centralisés à faibles couplages intersectoriels [1]. Les retours d'expérience les plus récents des pays européens ayant mis en place des SERI aux échelles locales (villages, villes, cantons, régions) indiquent que les grandes versatilité et adaptabilité locales des SERI dues à leur forte intégration inter-secteurs, inter-vecteurs, inter-stockages et à leur caractère décentralisé semblent être la source de leur efficacité et de leur résilience [2]. La *chaleur*, comme énergie primaire (chaleur renouvelable) et vecteur (réseaux de chaleur-froid, co- & tri-génération), y joue un rôle très important au vu des besoins finaux majoritaires en chaleur et froid [3].

Cet article étudie tout d'abord la répartition théorique des *flux énergétiques* au sein d'un SERI en fonction des possibilités de couplages internes de ses structures (réseaux énergétiques, stockages, transports) répondant à une répartition donnée des *besoins énergétiques finaux utiles* (chaleur-froid, électricité spécifique, mobilités, etc.), pour déterminer l'impact des choix de structures et d'équipements sur l'efficacité du système, les productions d'électricité nécessaires, les consommations de bioénergies, etc.

L'article applique ensuite un modèle de *simulation horaire et annuelle* à un système énergétique réel à l'échelle d'un département français (Haut-Rhin) en faisant évoluer sa structure énergétique actuelle vers celle d'un SERI par transformations systémiques séparées ou couplées, et évalue l'impact de celles-ci sur ses échanges électriques avec l'extérieur, ses émissions de GES, son efficacité énergétique. L'importance de la *chaleur*, des *stockages thermiques et électriques couplés aux différents réseaux d'énergie* est soulignée à chaque étape.

2. Les systèmes énergétiques renouvelables intelligents (SERI)

La méthodologie de l'étude présentée ici consiste, en partant des *énergies finales utiles* EU_i appelées par les agents du système énergétique local considéré, à déterminer les quantités des différentes *énergies primaires* EP_j nécessaires à y injecter pour élaborer, transférer et stocker les différents *énergies secondaires* (vecteurs énergétiques) ES_k puis les *énergies finales avant usage* EF_l fournies aux utilisateurs, au moyen de diverses *transformations technologiques*

indispensables (*Primaires, Secondaires, Finales*) d'efficacités $\eta_{t,m}$ ($t = P, S, F$; m représente la technologie de la transformation considérée) – chacune générant des *pertes d'énergie thermique* $W_{t,m}$ irréversible vers l'environnement –, ainsi que les émissions directes de GES.

Le principe fonctionnel du SERI repose sur les schémas structurels suivants :

- *couplage inter-vectorel* : interconnexion des réseaux d'énergie locaux (chaleur-froid, électricité, gaz) et des réseaux d'eaux de pluie et d'eaux usées (effluents urbains d'élevage) ;
- *couplages intersectoriels* : interconnexion générale des bâtiments industriels, tertiaires et secondaires aux réseaux énergétiques interconnectés, et des mobilités électriques ;
- *couplages inter-stockages énergétiques* locaux (chaleur-froid, électricité, combustibles, déchets), incluant celui des mobilités électriques aux réseaux énergétiques interconnectés ;
- *couplage inter-énergies* : interconnexion générale des systèmes de production et de conversion des énergies renouvelables locales aux réseaux énergétiques interconnectés ;
- *gestion intelligente* de l'optimisation, de la flexibilité et de la stabilité du SERI {réseaux, stockages, productions, conversions énergétiques couplées} selon des critères d'efficacité, d'émissions de GES, de retour sur investissements, de prix ;
- *minimisation des pertes énergétiques* ;
- *sobriété énergétique* (structurelle, systémique, individuelle) ;
- *soutenabilité* (énergies renouvelables thermiques, électriques et combustibles ; élimination des GES ; préservation des écosystèmes ; économie circulaire interne maximisée).

La *recherche de cohérence* du SERI entre potentiels énergétiques renouvelables locaux, réseaux et stockages énergétiques, besoins énergétiques des secteurs requiert le calcul de tous les flux d'énergie en fonction des efficacités de leurs conversions, stockages, transports et distributions, de l'échelle annuelle (bilan) jusqu'à l'échelle horaire (équilibre). La *recherche d'autonomisation énergétique* du SERI local vise à optimiser la gestion de ses ressources en énergies renouvelables (EnR) pour éviter les dépendances énergétiques, qui sont les paramètres-sortie pour l'analyse de l'efficacité du système et de ses connexions externes.

3. Flux et efficacités énergétiques des systèmes énergétiques

Pour déterminer les consommations en *énergies primaires EP* (thermiques H_p , électriques EL_p , combustibles F_p) d'un système énergétique quelconque sur un territoire géographique donné à partir de ses consommations en *énergies finales utiles* (*chaleur totale H, froid total C, électricité spécifique EL, mobilité T*), on établit les équations de conservation des flux énergétiques (1) à travers les unités de production et de conversion du système prenant en compte leurs efficacités énergétiques $\eta_{t,m}$ et les pertes thermiques $W_{t,m}$ afférentes, principalement :

- centrales thermiques de production électrique PP classiques (efficacité électrique η_{PP})
- *unités de cogénération* (efficacité électricité $\eta_{CHP,el}$; efficacité chaleur $\eta_{CHP,h}$)
- *chaudières à combustibles* (efficacité η_{FB}) et chaudières électriques (efficacité η_{EB})
- *unités de production électrique renouvelable* hydraulique, éolienne, photovoltaïque, hydrolienne, marémotrice, etc. hors cogénération électrique (efficacités $\eta_{REL} = 1$)¹

¹ Il s'agit de l'efficacité énergie utile/énergie payante. Dans le cas des énergies renouvelables, il n'y a pas d'énergie payante, les sources d'énergie renouvelables étant libres, naturelles et gratuites par essence.

- unités de pompes à chaleur PAC (efficacité η_{HP}) et de réfrigération (efficacité η_R)
- véhicules électriques (η_{EV}), thermiques (η_{TV}), transports publics électriques (η_{TE})
- chaînes hydrogène (production, compression et/ou liquéfaction, transport, détente, conversion) de véhicules H_2 (η_{HV}) et cogénération H_2 (électricité $\eta_{TGH,el}$; chaleur $\eta_{TGH,h}$).

La structure complète d'un SERI peut intégrer également d'autres technologies de couplage inter-vectorel (thermofrigopompes, pompes à chaleur et réfrigérateurs à absorption, turbines à cycle organique de Rankine ORC, chargeurs bidirectionnels de véhicules électriques *Vehicle-to-Grid* [4] et *Vehicle-to-Building* [5] ; cogénération par gazéification hydrothermale, liquéfaction hydrothermale et pyro-gazéification d'effluents liquides urbains et d'élevage, unités de méthanation, etc.). Les *installations de stockage-déstockage fixe multi-énergie* (chaleur, froid, électricité, combustibles), *multi-échelles temporelles* (minute, heure, jour, semaine, mois, saison) et *spatiales* (bâtiment, quartier, ville, agglomération, métropole, etc.) complètent l'architecture interne et les connexions externes (transport électricité, gaz).

3.1. Équations paramétriques du bilan énergétique d'un SERI autonome

A titre d'exemple, le dimensionnement de la structure d'un SERI de base autonome simplifié (sans machines à absorption ni turbines ORC ni chaudières électriques) conduit au système de variables, paramètres et équations des flux d'énergie annuels ci-dessous (1), où :

$$\begin{aligned}
 (a) \quad & \begin{cases} H = H_{RE} + H_{FB} + H_{EB} + H_{CHP} + H_{HP} \\ EL = EL_{RE} + EL_{CHP} - EL_{EV} - EL_{HV} - EL_{HP} - EL_{EB} - EL_{TE} - EL_R \\ T = EL_{EV}\eta_{EV} + EL_{HV}\eta_{HV} + EL_{TE}\eta_{TE} + F_{TV}\eta_{TV} \\ C = EL_R\eta_R \end{cases} \\
 (b) \quad & \begin{cases} H_{RE} = X_{REH}H, H_{FB} = X_{FB}H \\ EL_{RE} = X_{REL}(EL + EL_{HV} + EL_{HP} + EL_{EB} + EL_{TE} + EL_R) \\ EL_{EV} = X_{EV}T / \eta_{EV}, EL_{TE} = X_{TE}T / \eta_{TE}, EL_{HV} = X_{HV}T / \eta_{HV} \\ X_{REH} + X_{FB} + X_{EB} < 1, X_{EV} + X_{TE} + X_{HV} + X_{TV} = 1 \end{cases} \quad (1) \\
 (c) \quad & \begin{cases} F_{RE} = F_{FB} + F_{CHP} + F_{TV} \\ F_{FB} = H_{FB} / \eta_{FB}, F_{TV} = TX_{TV} / \eta_{TV} \\ F_{CHP} = H_{CHP} / \eta_{CHP,h} = EL_{CHP} / \eta_{CHP,el} \\ EL_{HP} = H_{HP} / \eta_{HP} \end{cases}
 \end{aligned}$$

- les *objectifs visés* sont les taux de couverture : X_{REL} de la consommation électrique totale par les *énergies électriques renouvelables* ; X_{REH} et X_{FB} des besoins de chaleur par la *production de chaleur renouvelable* directe (solaire thermique, géothermies) et par les *chaudières à biocombustibles* issus de la biomasse ; X_{EV} , X_{HV} , X_{TE} des besoins de transport par les *véhicules électriques*, *véhicules hydrogène* et les *transports en commun électriques*, respectivement, le reste étant couvert par les véhicules thermiques (biogaz) ;
- les *solutions* sont les variables contraintes de *production électrique par cogénération renouvelable* EL_{CHP} et de *consommation électrique des pompes à chaleur* EL_{HP} ;
- les grandeurs énergétiques induites recherchées sont la *consommation totale de biocombustibles* F_{RE} et la *production d'électricité renouvelable* EL_{RE} en fonction des objectifs visés X_{obj} , les autres grandeurs énergétiques étant obtenues directement (*production de chaleur*

renouvelable directe H_{RE} , de chaleur par chaudière biomasse H_{FB} , de chaleur de cogénération renouvelable H_{CHP} et l'électricité totale secondaire consommée EL_s).

3.2. Productions renouvelables nécessaires aux besoins énergétiques d'un SERI local

Dans l'exemple de SERI de base qui suit, seules les conversions les plus efficaces sont utilisées (pas de chaudières électriques, de véhicules H_2 ou thermiques), et les productions de froid C sont agglomérées aux productions de chaleur H_{HP} par PAC, les efficacités η_{HP} et η_R étant similaires. La configuration retenue est donc la suivante (unité quelconque) :

- besoins en énergies finales utiles fixés : $H = 50$, $C = 10$, $EL = 20$, $T = 20 \Rightarrow EU = 100$:
- taux de couverture visés : $X_{REL} = 0,6$; $X_{REH} = 0,3$; $X_{FB} = 0,1$; $X_{EV} = 0,7$; $X_{TE} = 0,3$;
- efficacités fixes : $\eta_{CHP,el} = 0,5$; $\eta_{CHP,h} = 0,45$; $\eta_{HP} = \eta_R = 3$; $\eta_{EV} = \eta_{TE} = 0,85$; $\eta_{FB} = 0,9$.

La Figure 1 résume la solution unique du système d'équations rendant ce SERI autonome.

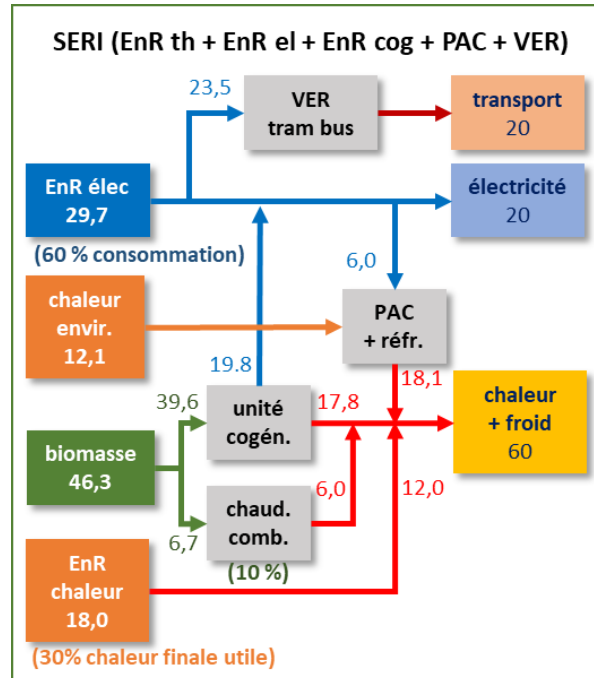


Figure 1 : Exemple de dimensionnement d'un SERI simplifié.

L'efficacité globale $\eta_{sys} = EP/EU$ du SERI est très élevée (94,2 %) du fait des couplages inter-vectoriels et intersectoriels et de l'injection massive des EnR. En comparaison, celle d'un système classique (centrales électriques non nucléaires sans cogénération, chaudières à combustibles, voitures thermiques) est au mieux de 56,3 %.

À des fins de planification et d'optimisation du SERI local dans l'objectif d'un système 100 % renouvelable et autonome, les paramètres primaires de dimensionnement X_{REL} , X_{REH} , X_{FB} , X_{EV} , X_{TE} , X_{HV} – et éventuellement les paramètres secondaires (taux de pompes à chaleur et réfrigérateurs à absorption, thermofrigopompes, turbines ORC, chaudières électriques, etc.) – doivent balayer toute la plage valide de fonctionnement du système pour mettre les *productions renouvelables résultantes* (chaleur-froid, électricité, biomasses, déchets renouvelables) en regard des potentiels énergétiques renouvelables installables localement. On observe ainsi (Fig. 2) que l'injection croissante de chaleur renouvelable (de 0 à 30 % des besoins) diminue la consommation de biomasse F_{RE} (-8,5 %) et la production totale EL_p d'électricité (-9,8 %),

celle-ci passant de 54,9 % à 49,6 % de la consommation d'énergie finale *EU* (voire à 46 % si 50 % des besoins chaleur-froid sont couverts par chaleur renouvelable). L'utilisation de chaudières biomasse (passant de 0 à 10 % des besoins en chaleur) permet aussi d'abaisser la production totale (et donc la consommation) d'électricité (-3,5 %) mais augmente la consommation totale de biomasse (+12,7 %) car la cogénération est plus efficace.

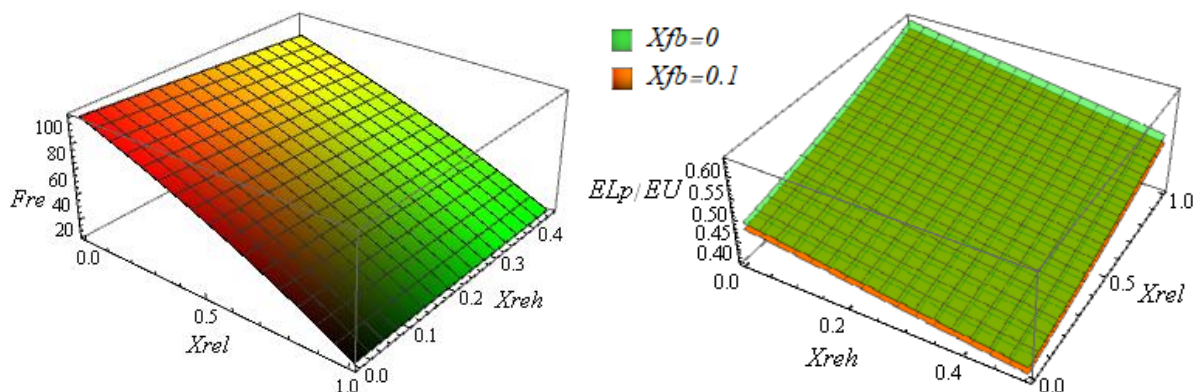


Figure 2 : Impact de la chaleur et de l'électricité renouvelables sur la consommation de biomasse (à gauche) et d'électricité (à droite).

La validation du dimensionnement des installations de production nécessite de dimensionner les *stockages* nécessaires par simulations horaires (section 4). Ceci requiert la connaissance prévisionnelle des *distributions horaires annuelles* : i) des consommations d'électricité spécifique, de transport, de chaleur et de froid intégrant flexibilité et stabilité des réseaux électriques ; ii) des températures atmosphériques et précipitations locales futures des scénarios climatiques urbains ; iii) des débits hydrologiques de surface ; iv) des régimes locaux de vent et d'insolation. L'analyse fréquentielle des distributions détermine les volumes et puissances de charge-décharge des stockages avec les technologies V2G, V2B, PTES (*pit thermal energy storage*), TTES (*tank thermal energy storage*), BTES (*borehole thermal energy storage*), etc.

4. Simulations évolutives d'un système énergétique local

L'analyse complète du système énergétique du Haut-Rhin, son évolution tendancielle et la simulation de ses transformations possibles vers un SERI ont été menées dans le cadre du LabEx DRIHM (projet ESTEES de l'OHM Fessenheim) [6] et se poursuivent pour dresser un ensemble de scénarios fonctionnels de transition énergie-climat à l'intention des décideurs.

Le programme d'analyse et de simulation des systèmes énergétiques EnergyPLAN [7], développé à l'Université d'Aalborg (Danemark) et mondialement utilisé en recherche, est mis en œuvre ici pour modéliser le système énergétique actuel du Haut-Rhin, et déterminer l'impact séparé puis couplé de changements structurels (couplages inter-vectoriels et intersectoriels, EnR, stockages, réseaux de chaleur, électrification des transports, flexibilités) sur les productions, consommations et échanges d'énergie à besoins constants. EnergyPLAN permet de modéliser en détail les structures d'un système énergétique quelconque et de les simuler heure par heure selon des stratégies d'optimisation technologique et/ou économique [8].

La validation du modèle EnergyPLAN du système Haut-Rhin a été menée en élaborant : i) une base de données énergie climat (BDEC) complète et détaillée sur l'année 2018 ; ii) les distributions horaires (Fig. 3) évoquées plus haut ; iii) la simulation du système pour déterminer les flux horaires et annuels de production-consommation-stockage d'énergies primaires à partir des consommations finales et des unités de conversion-stockage des vecteurs d'énergie.

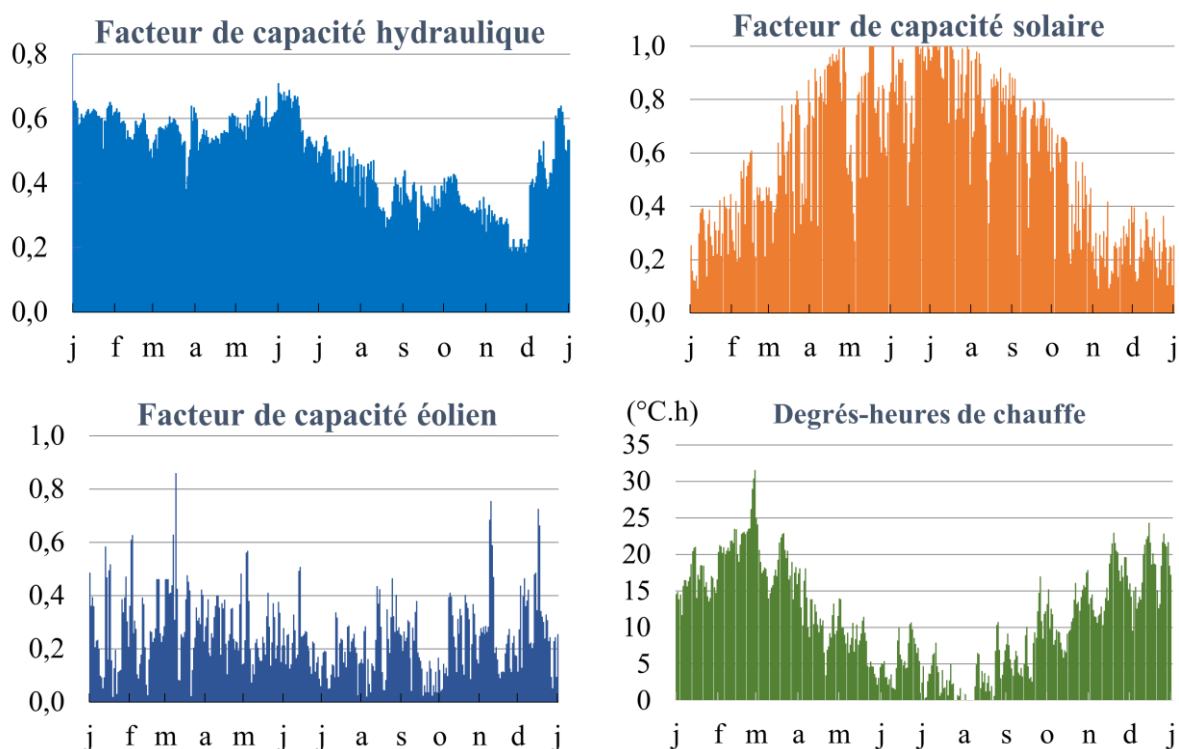


Figure 3 : Distributions horaires implémentées dans le modèle EnergyPLAN (Haut-Rhin 2018).

Le faible écart (de 0 à 5,2 % maximum) entre les données et les résultats de simulation a permis de valider la modélisation du système 2018.

4.1. Impact de changements technologiques isolés (chaleur, transport)

L'introduction séparée de certaines technologies dans le système initial (structure et consommations 2018) est simulée pour en étudier les effets sur son bilan énergétique et son fonctionnement (Fig. 4) : remplacement du chauffage électrique par des PAC (**scénario S1pac**) ; connexion de la moitié des logements individuels aux réseaux de chaleur existants sans cogénération (**scénario S2rc**) ou avec cogénération et équilibre simultané de la demande en chaleur et en électricité (**scénario S3rccog**). S1pac induit un gain d'électricité de 54 % sur le poste chauffage (6 % sur la consommation totale d'électricité) et une diminution d'imports électriques de 15 % (hors centrale nucléaire de Fessenheim) qui atteint 50 % dans le scénario S3rccog. Ceci montre l'efficacité du couplage régulé {réseau de chaleur, cogénération} à baisser les imports électriques. La baisse des émissions de CO₂ induite (à mix énergétique du chauffage inchangé) est déjà nette pour le secteur chaleur (-8 à -14 %).

L'électrification de 50% du transport routier de 2018 selon trois modes de recharge électrique (charge directe ; charge intelligente ; 50 % charge intelligente + 50 % V2G) accroît immédiatement les échanges d'électricité, mais la charge intelligente et le V2G réduisent ceux-ci de 30 à 40 %, plus efficacement que sans électrification du parc routier, si la part des EnR électriques variables (à 50 % éolien + 50 % PV) dépasse 60% du mix électrique d'équilibre import-export (Fig. 5), en baissant de 17 % les émissions totales de CO₂. En électrifiant tout le transport (50 % charge intelligente + 50 % V2G), les émissions directes totales de CO₂ baisseraient de 34% et la consommation d'énergie du transport de 80%, à demande constante (en km parcourus annuels). L'électrification des transports apparaît comme un levier puissant de stockage-flexibilité (et de décarbonation) des systèmes, même actuels.

4.2. Impact des couplages intersectoriels et des régulations d'équilibrage réseaux

Les *régulations de flexibilité et d'équilibrage simultanées des réseaux électriques et de chaleur* ont un impact d'autant plus élevé sur les échanges extérieurs d'électricité du système que la part d'EnR électriques variables dans le mix électrique augmente. Les simulations suivantes (Fig. 6) introduisent certains *couplages intersectoriels* dans la structure 2018 du Haut-Rhin (sans changement des besoins en énergies finales) : 50 % du chauffage individuel sur réseaux de chaleur ; chauffage électrique substitué par des PAC ; réseaux de chaleur : solaire thermique 30%, récupération chaleur industrielle 25 %, cogénération 25 % à 2/3 biomasse et 1/3 gaz naturel ; transport routier 50% électrique (dont 50 % en V2G) ; STEP (station de transfert d'énergie par pompage) 55 MW, 590 MWh ; stockage thermique 200 GWh/an.

Avec le seul équilibrage de la chaleur, les PAC cherchant à utiliser uniquement les excès critiques d'électricité (dépassant les capacités des lignes de transmission) et le V2G limité à l'équilibre de ces derniers (**scénario SERI 1**), la baisse des échanges électriques passe de 18 à 62 % si la part d'EnR électrique variable (0,5 éolien + 0,5 PV) passe de 0 à 60% des besoins électriques ; elle est moindre au-delà, ces régulations étant limitées. Avec l'*équilibrage simultané des demandes en chaleur et électricité*, où les PAC utilisent les exports d'électricité et le V2G participe à l'équilibre des exports-imports électriques (**scénario SERI 2**), la baisse des échanges électriques passe de 15 à 63 % avec l'injection d'EnR électrique variable de 0 à 60 %, et atteint 100 % à 100 % d'EnR électrique variable grâce aux contributions élevées de l'hydroélectricité et de la STEP. Le couplage régulé du stockage électrique des batteries des véhicules en V2G et dans la STEP, du stockage thermique, du solaire thermique, de la cogénération et des PAC peut réduire fortement, voire annuler les besoins d'échange électrique.

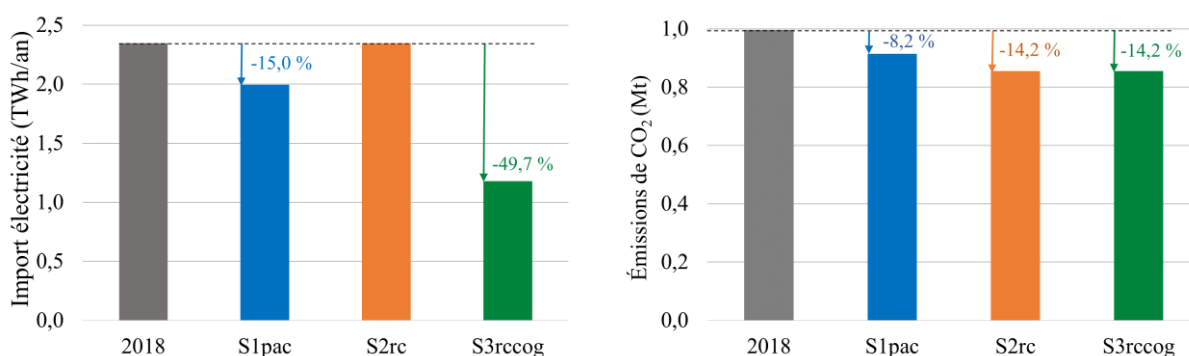


Figure 4 : Impact des scénarios de chauffage sur l'import d'électricité et les émissions de CO₂ du secteur chauffage (Haut-Rhin).

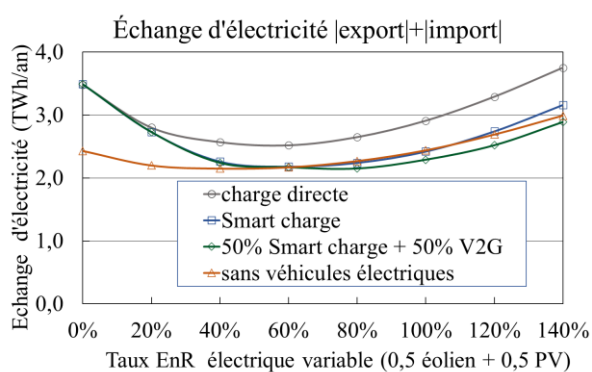


Figure 5 : Impact de l'électrification du transport (Haut-Rhin, 2018).

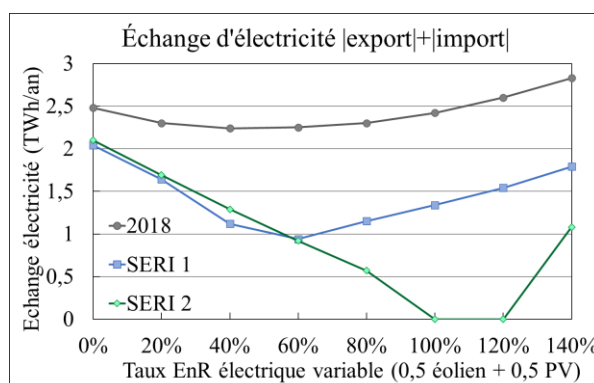


Figure 6 : Impact de l'introduction de couplages et régulations (Haut-Rhin, 2018).

Ces deux scénarios génèrent d'ores et déjà une baisse de 32,6 % des émissions de CO₂ alors qu'ils restent basés sur les besoins 2018 sans changement du secteur industriel ni éradication du gaz naturel des réseaux de chaleur. Ceci confirme *l'efficacité de l'introduction de couplages chaleur-électricité-transport régulés dans la décarbonation du mix énergétique*.

4.3. Scénarisation des transitions de type SERI

L'étape suivante de modélisation et de simulation des structures SERI possibles, actuellement en cours, s'appuie sur la méthodologie de déclinaison territoriale des objectifs nationaux et européens de transition énergie-climat pour élaborer la configuration des besoins en énergies finales utiles vers 2050 et après, prenant en compte les sobriétés structurelles, systémiques et individuelles indispensables. Elle intègre l'ensemble des technologies efficaces de couplage, de stockage et de production énergétique permettant de couvrir tout ou partie des besoins du territoire (Haut-Rhin) à cet horizon à partir de l'ensemble de ses potentiels en énergies renouvelables, tout en assurant la résilience et la stabilité des réseaux énergétiques internes et interconnectés, en particulier avec les réseaux européens.

5. Conclusion

La modélisation et la simulation des SERI locaux, basée sur l'analyse des besoins en énergies finales utiles et sur le déploiement des techniques modernes de gestion intelligente de couplage intersectoriel, inter-vectorel des réseaux, stockages des énergies renouvelables locales, sont des outils souples et performants pour l'aide à la planification territoriale énergie-climat grâce aux retours d'expérience nombreux et aux recherches internationales croissantes.

Références

- [1] T. de Larochelambert, F. Labaude, N. Blond, Integration of a Smart Renewable Energy System in sustainable and resilient urban energy-climate planning, *JITH 2024 – 20ème édition Bâtir écologique pour une résilience climatique* (ENSA Paris-Val de Seine, 29 – 31 oct 2024), *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer* (à paraître, 2025).
- [2] J.Z. Thellufsen, H. Lund, P. Sorknæs, P.A. Østergaard, M. Chang, D. Drysdale, S. Nielsen, S.R. Djørup, K. Sperling, Smart energy cities in a 100% renewable energy context, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129 (2020), 109922.
- [3] T. de Larochelambert, La chaleur et le froid dans la transition énergétique, *28e Congrès français de thermique* (Belfort, 9-12 juin 2020), 133.
- [4] B. Bibaka, H. Tekiner-Moğulkoç, A comprehensive analysis of Vehicle to Grid systems and scholarly literature on the application of such systems, *Renewable Energy Focus* 36 (2021), 1-20.
- [5] K.Y. Lo, J.H. Yeoh, I.Y.L. Hsieh, Towards Nearly Zero-Energy Buildings: Smart Energy Management of Vehicle-to-Building (V2B), *Strategy and Renewable Energy Sources, Sustainable Cities and Society* 99 (2023), 104941.
- [6] <https://ohm-fessenheim.fr/recherche/apr/porteurs/nadege-blond-thierry-de-larochelambert/>
- [7] EnergyPLAN Advanced energy system analysis computer model, <https://www.energyplan.eu/>.
- [8] P.A. Østergaard, H. Lund, J.Z. Thellufsen et al., Review and validation of EnergyPLAN, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168 (2022), 112724.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'OHM Fessenheim et a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'ANR au titre du LabEx DRIIHM (ANR-11-LABX-0010).