

Flexibilité pour la durabilité des systèmes multi-énergie : le cas d'une grande infrastructure de recherche

Séverin VALLA¹, Nana TWUM-DUAH^{1,2}, Sacha HODENCQ¹, Francois DEBRAY², Frédéric WURTZ¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

²Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), CNRS UPR 3228, EMFL, Université Toulouse III—Paul Sabatier, Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, Institut National des Sciences Appliquées, Université Grenoble Alpes, 38042 Grenoble CEDEX, France

RESUME - Face aux enjeux de décarbonation et d'efficacité énergétique, cette étude examine les solutions de flexibilité énergétique et de valorisation de chaleur fatale appliquées à l'étude du Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), une infrastructure de recherche consommant de l'ordre de 10 GWh annuel d'électricité. En s'appuyant sur une approche systémique, intégrant l'analyse des flux énergétiques et l'optimisation des émissions de gaz à effet de serre, nous évaluons les bénéfices environnementaux de ces solutions. Ce travail propose une méthodologie ouverte et reproductible, spécifiquement adaptée aux infrastructures électro-intensives.

Mots-clés : *flexibilité énergétique, chaleur fatale, système énergétique, durabilité, réseau électrique, réseau thermique*

1. INTRODUCTION

La consommation d'énergie liée aux activités humaines est responsable de près des trois quarts des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au dépassement des limites planétaires, en particulier celle du changement climatique. Pour tendre vers des systèmes énergétiques durables, plusieurs leviers ont été identifiés : la sobriété énergétique, l'efficacité énergétique, et le développement des énergies renouvelables pour remplacer les sources carbonées [1].

La flexibilité énergétique et les synergies entre vecteurs énergétiques sont également identifiées comme des éléments clés pour répondre aux défis de l'intermittence des énergies renouvelables et améliorer l'efficacité globale des systèmes [2]. Ces leviers et stratégies doivent être prioritairement mobilisés dans les systèmes énergivores, où les potentiels de réduction des impacts environnementaux sont les plus élevés.

Certaines infrastructures de recherche électro-intensives constituent à ce titre des terrains à la fois pertinents et stratégiques. En France, le secteur de la recherche contribue aux émissions globales du secteur public, lequel représentait environ 12 % de l'empreinte carbone individuelle des Français en 2021[3]. Par ailleurs ces installations, représentatives de systèmes électro-intensifs, peuvent permettre de tirer des conclusions généralisables à d'autres secteurs, notamment industriels.

Bien que la flexibilité énergétique soit reconnue comme essentielle pour intégrer les énergies renouvelables intermittentes, peu d'études détaillent et quantifient ses impacts environnementaux. De plus, les études existantes manquent souvent d'une approche systémique, ce qui peut entraîner l'invisibilisation de certains phénomènes (e.g. effets rebonds, transferts d'impacts indésirables). Enfin, malgré l'existence d'études de potentiel de flexibilité dans les secteurs électro-intensifs [4], rares sont celles avec des données ouvertes, des modèles accessibles et des codes open source.

Cet article propose d'explorer ces enjeux en étudiant le cas du site grenoblois du Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), une infrastructure de recherche dont la consommation annuelle d'électricité s'élève à 10 GWh. Une approche systémique est adoptée pour évaluer la combinaison des leviers de flexibilité énergétique et de valorisation de chaleur fatale, avec pour objectif la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'ensemble des données et des méthodologies utilisées sera publié en « open source », garantissant transparence et reproductibilité.

L'article s'organise autour de cinq axes. Il débute par une exploration des liens entre flexibilité énergétique et durabilité, en posant le cadre d'analyse retenu. Il se poursuit avec la présentation du site grenoblois du LNCMI et de son potentiel en matière de récupération de chaleur fatale et de flexibilité énergétique. La méthodologie d'évaluation est ensuite détaillée, ainsi que les scénarios étudiés. Les résultats obtenus sont présentés puis analysés. Enfin, l'article se termine par une discussion critique portant sur les limites du modèle, les améliorations méthodologiques envisagées, et les perspectives d'évolution.

2. FLEXIBILITE ET DURABILITE

2.1. La flexibilité énergétique

La flexibilité énergétique est aujourd'hui reconnue comme un élément central des systèmes énergétiques en transition. Elle désigne la capacité d'un moyen de production, de consommation ou de stockage d'énergie à modifier le moment de l'injection ou du soutirage à la demande [5].

* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

Cette capacité devient d'autant plus importante avec l'intégration croissante des énergies renouvelables, dont la variabilité et l'incertitude complexifient le maintien de l'équilibre offre-demande en temps réel [6]. En parallèle, l'électrification progressive des usages (mobilité, chauffage) accroît les sollicitations sur les réseaux, rendant indispensable une gestion plus souple et réactive.

Initialement centrée sur l'électricité, la notion de flexibilité s'étend aujourd'hui à d'autres vecteurs énergétiques. Dans les systèmes multi-énergies, comme les infrastructures de recherche, elle peut reposer sur l'interconnexion avec des réseaux de chaleur ou de froid, capables de stocker l'énergie thermique et de moduler la demande, ainsi que sur des technologies de conversion telles que le « power-to-gas », permettant de transformer les excédents d'électricité en gaz. Ces approches traduisent une tendance vers des systèmes plus intégrés où la flexibilité est une propriété partagée entre plusieurs vecteurs énergétiques.

La flexibilité peut provenir de différentes composantes du système énergétique. Trois principales sources sont généralement distinguées dans la littérature : la demande, notamment dans les secteurs résidentiel, tertiaire ou industriel ; la production, via des moyens pilotables ou modulables ; les infrastructures, comme le stockage ou les interconnexions [7].

La diversité des formes de flexibilité a donné lieu à de nombreuses classifications, permettant de l'analyser selon des caractéristiques spécifiques. Du côté de la demande, une distinction souvent utilisée – et qui sera reprise dans la suite de ce travail – concerne le mode de mobilisation : on distingue la flexibilité explicite de la flexibilité implicite. La flexibilité explicite, qui repose sur l'activation volontaire et contractualisée de ressources flexibles, souvent via un agrégateur, en échange d'une compensation financière. Elle est généralement mobilisable à court terme, voire en temps réel, et peut être contrôlée de manière centralisée [8]. La flexibilité implicite, résulte de changements structurels dans les usages ou comportements des usagers, souvent à long terme (décalage de consommation, le choix technologique). Elle n'est pas activée directement par le système mais peut être provoquée implicitement par des incitations financières comme la variation du prix de l'énergie. Moins contrôlable, elle peut néanmoins produire des effets durables sur la demande [8].

D'autres classifications de la flexibilité énergétique sont également proposées dans la littérature. Celles-ci peuvent s'appuyer sur le degré d'automatisation de l'activation (flexibilité directe ou indirecte) [9], sur les types de services fournis au réseau (par exemple, flexibilité de puissance, d'énergie, de capacité de transfert ou de régulation de tension) [10], ou encore sur les échelles temporelles mobilisées (court, moyen ou long terme) [5]. Ces approches soulignent la diversité des formes de flexibilité ainsi que des cadres d'analyse, qui varient selon les contextes, les acteurs impliqués et les objectifs poursuivis [11].

2.2. Durabilité des systèmes énergétiques

La notion de durabilité s'est imposée comme un cadre de référence dans l'étude des transitions socio-écologiques. Elle a d'abord été popularisée par le rapport Brundtland (1987), qui la définit comme la capacité à répondre aux besoins du présent sans compromettre ceux des générations futures [12].

Depuis, cette notion a été approfondie et a donné lieu à plusieurs courants de pensée, parmi lesquels deux approches principales se dégagent : la durabilité faible et la durabilité forte.

Dans une perspective de durabilité faible, le capital naturel peut être substitué par d'autres formes de capital (technologique, humain, économique). Cette approche repose sur l'idée que le progrès technologique et la croissance économique peuvent compenser les pertes environnementales [13]. À l'inverse, la durabilité forte [13], considère que certaines composantes de l'environnement – comme les cycles biogéochimiques, la biodiversité ou le climat – ne peuvent pas être remplacées par d'autres formes de capital. Ces éléments doivent donc être préservés pour garantir la stabilité des systèmes naturels sur lesquels reposent les sociétés humaines.

Plus récemment, le modèle du "donut" proposé par Raworth [14] a cherché à articuler à la fois les limites sociales et écologiques. Ce cadre représente la durabilité comme un espace sûr et juste pour l'humanité, situé entre deux seuils : un plancher social, en dessous duquel les besoins humains fondamentaux ne sont pas satisfaits (accès à l'énergie, santé, éducation...), et un plafond environnemental, au-delà duquel les pressions écologiques menacent les équilibres planétaires. La durabilité consiste donc à rester à l'intérieur de ces limites, en combinant justice sociale et respect des limites planétaires.

Appliqué au secteur de l'énergie, ce cadre permet d'évaluer les systèmes énergétiques et les leviers de transition en tenant compte de leurs impacts environnementaux et sociaux, au-delà des seuls aspects techniques ou économiques.

La flexibilité énergétique, en particulier, est généralement étudiée pour son rôle dans l'intégration des énergies renouvelables et la stabilité des réseaux, mais fait rarement l'objet d'une analyse globale sous l'angle de la durabilité. Cette étude s'inscrit dans ce cadre d'analyse, en se concentrant toutefois sur un aspect spécifique : l'impact de la flexibilité énergétique sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'un système énergétique. Ce critère, central parmi les limites planétaires, constitue un premier levier pour évaluer les bénéfices environnementaux de ces dispositifs.

2.3. Lien entre flexibilité et durabilité

La flexibilité énergétique offre plusieurs leviers pour réduire l'empreinte carbone des systèmes énergétiques :

- Elle permet de limiter le recours aux énergies fossiles, particulièrement lors des pics de demande, en alignant la consommation d'énergie sur les périodes où l'électricité est décarbonée.
- Elle facilite l'intégration des énergies renouvelables au réseau, en maximisant leur utilisation lorsqu'elles sont disponibles.
- Elle favorise une meilleure utilisation des ressources en renforçant les interactions entre vecteurs énergétiques lorsque cela est possible. Par exemple, elle peut optimiser la valorisation d'un système de récupération de chaleur fatale, contribuant ainsi à réduire la consommation énergétique globale.

Cependant, sa mise en œuvre peut également entraîner des effets rebond, en particulier lorsqu'elle est combinée à d'autres mesures de décarbonation. Par exemple, une solution peut nuire à l'efficacité d'une autre, ou une baisse des émissions sur un poste être compensée par une hausse sur un autre. Par ailleurs, l'intégration d'équipements comme des systèmes de stockage thermique ou électrique peut engendrer des impacts environnementaux supplémentaires liés à leur fabrication, leur maintenance et leur fin de vie. Il est donc essentiel d'évaluer ces solutions dans une approche systémique, et à l'échelle du cycle de vie.

3. LE LNCMI UN INSTRUMENT DE RECHERCHE A FORT POTENTIEL

3.1. ... de recuperation de chaleur fatale

Parmi les infrastructures de recherche, le LNCMI permet d'étudier le potentiel combiné de la récupération de chaleur fatale et de flexibilité énergétique.

Spécialisé dans la production de champs magnétiques intenses pour des expériences de physique, ce laboratoire consomme environ 10 GWh/an d'électricité avec une puissance électrique variable atteignant 30 MW pour alimenter des électro aimants à courant continu. L'intégralité de cette énergie électrique est transformée en chaleur par effet Joule dans les bobines des électro-aimants, puis rejetée dans une rivière voisine. Cette chaleur pourrait être valorisée pour couvrir une partie des besoins thermiques du site grenoblois du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) sur lequel le LNCMI est implanté.

Le projet de valorisation se heurte à deux principaux défis techniques. D'une part, un écart de température : la chaleur fatale peut être récupérée au maximum à 35 °C, tandis que le réseau de chauffage du CNRS nécessite une température d'au moins 50 °C. D'autre part, un écart en puissance et en temporalité : les rejets thermiques du LNCMI, sont bien supérieurs aux besoins des locaux du CNRS, mais leur profil dépend des expériences, qui produisent des champs très intermittents. Les besoins en chaleur du site du CNRS sont de l'ordre de 2 GWh annuel avec une puissance maximale, variant entre 1 et 2 MW au cours de la saison de chauffe (octobre à avril). La figure 1, illustre cet écart entre production et consommation. Par ailleurs, les besoins en chaleur du CNRS sont saisonniers, tandis que les rejets thermiques du LNCMI sont répartis tout au long de l'année.

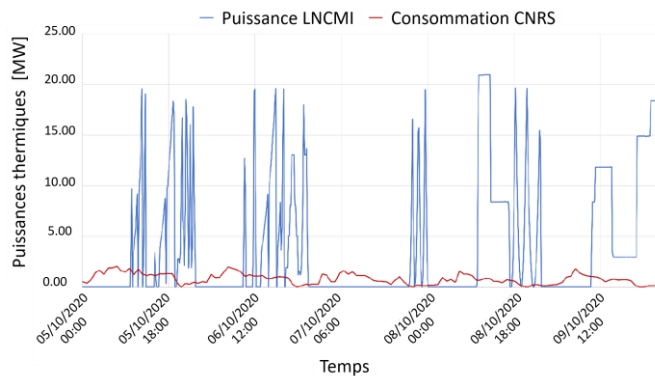


Figure 1. Profils de production thermique au LNCMI et de consommation de chaleur du CNRS sur 4 jours

Un système de récupération incluant un stockage thermique (STO) et une pompe à chaleur (PAC) a été étudié par le passé, et son fonctionnement optimisé grâce à une programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP). Ce système de valorisation, avec ses principales composantes, est illustré en figure 2. Néanmoins, cette première approche avait abouti à un taux de récupération de chaleur jugé insuffisant. Par la suite, des stratégies de flexibilité ont été explorées afin d'améliorer les performances énergétiques du système [15]. Plusieurs axes restent toutefois à approfondir, notamment l'exploitation complète du potentiel de flexibilité du laboratoire et

l'élargissement de la méthodologie vers une approche systémique.

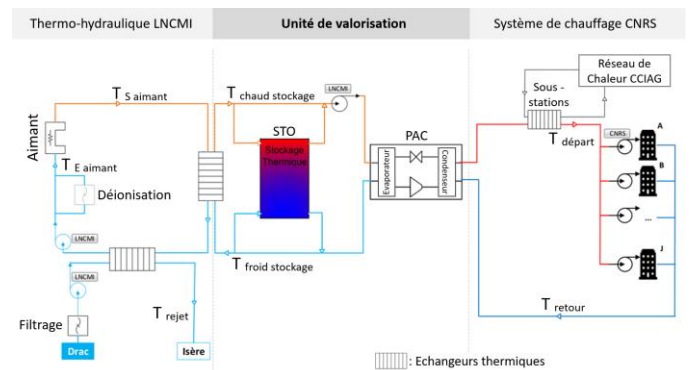


Figure 2. Schéma du système de valorisation d'énergie fatale du LNCMI avec pompe à chaleur et stockage thermique

3.2. ... de flexibilité énergétique

Le LNCMI possède un potentiel de flexibilité énergétique, lié à la nature intermittente et planifiable de son activité scientifique. La consommation électrique du laboratoire dépend directement de l'utilisation de ses aimants, lesquels sont activés seulement durant les expériences des chercheurs. La consommation est donc étroitement liée au calendrier expérimental, qui peut être modulable à plusieurs échelles de temps.

3.2.1. Flexibilité hebdomadaire

Le calendrier expérimental du laboratoire est défini tous les 6 mois, avec des périodes d'expériences organisées en blocs hebdomadaires. Les chercheurs, sélectionnés sur appel à projets, se voient attribuer une ou plusieurs semaines d'expériences. Chaque candidature inclut une estimation de l'énergie totale nécessaire sur la période. Bien que les profils de puissance ne soient pas détaillés, cette organisation permet d'anticiper la charge du site plusieurs mois à l'avance.

Cette prévisibilité ouvre la possibilité d'ajuster la répartition optimisée des semaines d'expérimentation selon des critères énergétiques.

3.2.2. Flexibilité intra-journalière

Un second levier de flexibilité existe à l'échelle quotidienne. Au cours d'une semaine d'expérimentation, les chercheurs se répartissent généralement la journée : un créneau le matin, un autre l'après-midi. Un seul aimant peut fonctionner à la fois, pour des durées allant de quelques minutes à plusieurs heures.

Les expériences ne démarrent qu'une fois l'ensemble des conditions réunies (disponibilité des aimants, préparation des instruments, validation technique). Une fois ces conditions remplies, le déclenchement reste flexible à l'intérieur de la journée. Ce décalage possible dans le temps offre un potentiel d'optimisation de la courbe de charge, en adaptant les horaires des expériences à des critères énergétiques

3.2.3. Flexibilité via un stockage thermique

Une autre source de flexibilité pourrait être ajoutée si un système de récupération de chaleur fatale incluant un stockage thermique de court terme (intra-journalier), est mis en place. Ce stockage permettrait de lisser les apports thermiques discontinus issus des expériences du LNCMI, en les répartissant plus progressivement selon la demande. Ce couplage entre flexibilité électrique et thermique offrirait de nouvelles marges d'ajustement et d'optimisation énergétique.

3.2.4. Modes de mobilisation de la flexibilité énergétique

Les leviers de flexibilité identifiés – à l'échelle hebdomadaire, intra-journalière et via le stockage thermique – constituent des sources de flexibilité mobilisables de différentes manières. Comme présenté en section 2.1, la flexibilité énergétique peut se décliner en deux formes principales : implicite et explicite.

D'une part, la mobilisation implicite consisterait à adapter l'organisation interne du laboratoire pour privilégier les périodes où l'intensité carbone (et le coût de l'électricité) est plus faible. Cette approche repose sur une modification structurelle des usages, sans signal extérieur direct. A l'inverse, la valorisation explicite implique une réponse à des sollicitations d'un agrégateur ou opérateur réseau, sur des horizons courts (de quelques jours à quelques minutes). Dans ce cadre, le LNCMI ajusterait sa consommation en temps réel pour contribuer à l'équilibre du réseau, notamment lors des périodes de tension.

Dans cet article, seule la flexibilité implicite est étudiée, via la replanification hebdomadaire des expériences et le stockage thermique. La valorisation explicite et la flexibilité intra-journalière feront l'objet de travaux futurs.

4. METHODOLOGIE

4.1. Analyse systémique

Les approches précédentes, centrées sur la valorisation de la chaleur ou la réduction des apports externes en chaleur, ne suffisent pas à optimiser l'impact environnemental. Cette étude adopte une approche systémique qui modélise l'ensemble des flux énergétiques au LNCMI et leurs interactions, avec pour objectif prioritaire la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et non plus la seule performance énergétique.

Cette méthodologie intègre notamment les effets rebond liés à la récupération de chaleur fatale. En effet, la valorisation de la chaleur issue des aimants implique une consommation électrique supplémentaire : d'une part, pour faire fonctionner la pompe à chaleur nécessaire au transfert thermique, et d'autre part, en raison d'une surconsommation intrinsèque des aimants. En période de valorisation, pour atteindre une température de sortie exploitable (environ 35 °C), le refroidissement est réduit, ce qui élève la température des aimants en cuivre. Or, la résistivité du cuivre augmentant avec la température, une puissance électrique plus élevée est alors nécessaire pour fournir le même champ magnétique.

L'analyse systémique prend également en compte les facteurs d'émission, variables dans le temps, associés aux différentes sources d'énergie consommées. Ces facteurs dépendent fortement du contexte local, comme le mix électrique français ou les caractéristiques du réseau de chaleur urbain de la Presqu'île de Grenoble. La prise en compte de ces facteurs peut profondément modifier certaines stratégies de flexibilité. Par exemple, reprogrammer une expérience à un moment favorable à la récupération de chaleur pourrait, paradoxalement, entraîner une augmentation des émissions si l'électricité est alors plus carbonée.

En intégrant ces dimensions, l'approche systémique permet d'identifier des stratégies de flexibilité vertueuses sur le plan environnemental.

4.2. Définition du système étudié et scenarios

Le périmètre d'étude comprend les installations expérimentales du LNCMI, et le système de chauffage du site CNRS sur lequel le LNCMI est implanté. Dans cet article, nous nous concentrons sur trois scénarios, combinant ou non valorisation de chaleur et flexibilité hebdomadaire :

- REF : scénario de référence, sans valorisation de chaleur ni flexibilité ;
- REF_HEBDO : flexibilité hebdomadaire seule (réorganisation du calendrier expérimental par semaine) ;
- VALO_HEBDO : valorisation de chaleur combinée à une flexibilité hebdomadaire.

Ces scénarios permettent d'évaluer l'impact d'une replanification hebdomadaire des expériences sur les émissions de CO₂, avec ou sans récupération de chaleur.

4.3. Outil de modélisation

La modélisation et l'optimisation du système sont réalisées à l'aide du logiciel OMEGAlpes (Optimization ModEls Generation As Linear Programs for Energy Systems), un outil open source développé en Python [15]. OMEGAlpes permet de modéliser des systèmes énergétiques multi-énergies. Une fois le modèle défini, il est transformé en un problème d'optimisation MILP grâce à la bibliothèque PuLP, afin de pouvoir être résolu par un solveur.

Pour chacun des scenario, l'objectif d'optimisation est la minimisation des émissions de CO₂ associées au fonctionnement du LNCMI. Les variables d'influences dépendent du scenario étudié mais incluent :

- L'ordre des semaines d'expériences sur une période de six mois.
- La gestion de la charge et de la décharge du stockage thermique.

Un Jupyter Notebook en ligne (i.e. un document de programmation combinant code, texte et résultats d'exécutions) assemble l'ensemble des éléments techniques de l'étude : hypothèses de modélisation, paramétrage du modèle, code d'optimisation, et liens vers les données utilisées. Ce document est accessible¹ sans installation d'environnement en passant par le service public Mybinder pour directement utiliser et potentiellement adapter le code et les données d'entrée.

4.4. Données utilisées

Cette étude mobilise plusieurs sources de données. La consommation électrique du LNCMI a été fournie par les techniciens du laboratoire à partir des enregistrements historiques des capteurs installés sur les aimants. Ces données, disponibles avec un pas de temps d'une seconde, ont permis de reconstruire une année type à partir de segments représentatifs issus d'années précédentes, en excluant les périodes affectées par des événements exceptionnels.

Les données liées au chauffage du CNRS ont été obtenues auprès du Service Technique et Logistique (STL) du CNRS. Elles comprennent, d'une part, les besoins en chaleur, transmis par le réseau de chaleur urbain avec une résolution de 10

¹ Accessible depuis le lien : [https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-](https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/tree/master/article_case_study/article_2025_SGE_flexibility_and_sustainability_LNCMI?ref_type=heads)

[/tree/master/article_case_study/article_2025_SGE_flexibility_and_sustainability_LNCMI?ref_type=heads](https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/tree/master/article_case_study/article_2025_SGE_flexibility_and_sustainability_LNCMI?ref_type=heads)

minutes, et d'autre part, les températures de départ et de retour du réseau de chauffage du site, à un pas de temps horaire.

Les facteurs d'émissions de CO₂ utilisés dans les modélisations incluent ceux du mix électrique français, fournis par la plateforme Electricity Map¹ au pas de temps horaire. Pour le chauffage urbain, les facteurs d'émission ont été estimés de manière fictive, sur la base d'une compréhension du réseau, les données réelles étant confidentielles.

5. RESULTATS PRELIMINAIRES

Le Tableau 1 présente les principaux résultats des scénarios, incluant la consommation annuelle d'électricité et de chaleur ainsi que les émissions de CO₂ associés.

	Élec [MWh]	Chaleur [MWh]	CO ₂ Élec [t]	CO ₂ Chaleur [t]	CO ₂ Total [t]
REF	13,774	2,768	434	203	637
REF-HEBDO	13,774	2,768	350	203	552
VALO-HEBDO	14,390	872	402	65	467

Tableau 1. Bilan annuel des consommations et émissions de CO₂ par scénario.

Ces résultats correspondent aux replanifications illustrées dans les Figures 3 et 4.

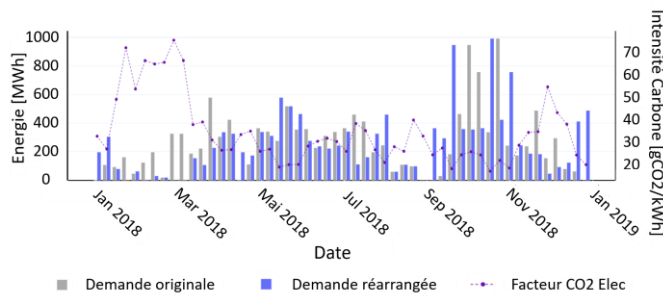


Figure 3. Profil énergétique annuel du LNCMI : scénario de référence et REF-HEBDO (pas hebdomadaire)

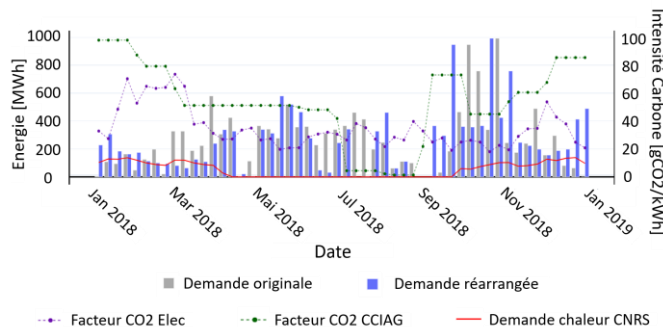


Figure 4. Profil énergétique annuel du LNCMI : scénario de référence et VALO-HEBDO (pas hebdomadaire)

Les résultats montrent qu'une replanification hebdomadaire permet de réduire les émissions de CO₂ de 13 % par rapport au scénario de référence. Lorsqu'elle est associée à un système de récupération de chaleur fatale, la réduction atteint 27 %. Ces résultats sont encourageants, car ils soulignent l'intérêt d'une approche intégrée de la flexibilité et de la valorisation énergétique, souvent traités en silo.

Dans le cas d'une replanification seule, la stratégie mise en œuvre suit une logique relativement intuitive : les expériences sont décalées vers les périodes où l'électricité est moins carbonée — généralement hors hiver — ce qui facilite son

application. En revanche, l'introduction de la valorisation complexifie les arbitrages entre électricité, chaleur récupérée et intensité carbone, rendant plus difficile l'identification de règles simples.

6. LIMITES ET PERSPECTIVES

6.1. Limites méthodologiques de l'optimisation

Les résultats obtenus dans cette étude reposent sur un modèle d'optimisation visant à réduire les émissions de CO₂. Celui-ci s'appuie sur des hypothèses idéalisées, en particulier une connaissance précise et anticipée des besoins énergétiques — par exemple, des consommations hebdomadaires connues six mois à l'avance. Ces résultats doivent donc être considérés comme un outil d'exploration, permettant d'identifier des tendances générales ou des stratégies de planification.

La prochaine étape consistera à tester ces stratégies dans des simulations intégrant des contraintes plus réalistes, afin d'évaluer leur faisabilité opérationnelle. Par ailleurs, bien que l'intégration de la valorisation énergétique rende difficile l'identification de règles simples, cette complexité souligne l'intérêt d'une approche intégrée pour l'étude de la flexibilité et de la valorisation de la chaleur fatale.

6.2. Prise en compte des contraintes techniques et contextuelles

À ce stade, le modèle prend en compte plusieurs paramètres d'influence pour orienter les optimisations. Toutefois, il ne reflète pas encore l'ensemble des contraintes techniques, environnementales et sociales qui, dans la pratique, conditionnent déjà la planification des expériences. Intégrer ces éléments, susceptibles d'affecter les stratégies de replanification, sera nécessaire pour progresser vers une modélisation plus opérationnelle.

Certaines contraintes techniques, par exemple la présence prolongée d'équipements sur les aimants, imposent des séquences expérimentales spécifiques qui s'étalent sur plusieurs semaines ou mois, réduisant ainsi la flexibilité effective du planning. À cela s'ajoutent des facteurs environnementaux, comme les épisodes orageux — plus fréquents à certaines saisons — qui affectent le fonctionnement des installations, ou encore les vagues de chaleur estivales, susceptibles d'échauffer l'eau de refroidissement et d'endommager les aimants. Sur le plan organisationnel, la disponibilité des équipes, notamment pendant les vacances scolaires, constitue également un paramètre important à prendre en compte.

6.3. Vers une approche systémique et intégrée

Au-delà de ces contraintes spécifiques, il est important d'articuler les stratégies étudiées avec d'autres leviers de décarbonation envisageables. Ainsi, une rénovation énergétique des bâtiments du site pourrait réduire les besoins de chauffage, et remettre en question la pertinence d'un système local de valorisation de chaleur. L'évaluation finale devra donc s'appuyer sur une approche intégrée, capable de tenir compte des interactions et arbitrages entre différentes solutions.

Par ailleurs, l'analyse actuelle se concentre uniquement sur les émissions directes, calculées à partir des consommations d'électricité et de chaleur, pondérées par leur intensité carbone. Pour aller vers une évaluation plus complète, il faudra également intégrer les effets indirects, comme les gains permis par une

¹ <https://app.electricitymaps.com/map/72h/hourly>

meilleure intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

6.4. Durabilité environnementale et sociale

L'évaluation proposée dans cette étude se limite aux émissions de CO₂ liées aux consommations énergétiques opérationnelles. Il s'agit d'un premier indicateur pertinent, mais insuffisant pour rendre compte de l'ensemble des impacts environnementaux et sociaux nécessaires au respect des limites planétaires et du plancher social.

Pour aller vers une évaluation plus complète de la durabilité, il faudra également considérer les autres ressources mobilisées par le système, comme l'eau ou les matériaux non renouvelables, ainsi que leurs impacts potentiels sur l'environnement, par exemple sur les écosystèmes. Des aspects sociaux devront aussi être intégrés, comme l'équité dans la répartition des bénéfices, l'acceptabilité des solutions proposées, ou encore la gouvernance des décisions. Une première étape concrète consistera à intégrer une analyse de cycle de vie (ACV) des équipements utilisés — pompes à chaleur, échangeurs, stockage thermique — afin d'évaluer leurs impacts sur l'ensemble de leur durée de vie, depuis leur fabrication jusqu'à leur fin de vie.

6.5. Nouvelles perspectives pour la modélisation de la flexibilité

Dans la continuité des pistes évoquées précédemment, une prochaine étape consistera à étendre le modèle à la flexibilité intra-journalière, en introduisant le load shifting, c'est-à-dire le décalage des horaires de démarrage des expériences. Cette approche pourrait permettre d'identifier des stratégies de replanification à l'échelle de la journée, mobilisables dans une logique de flexibilité implicite.

À plus long terme, il serait également pertinent d'explorer la valorisation explicite de la flexibilité, en intégrant non seulement le load shifting, mais aussi le load shedding — c'est-à-dire la possibilité d'interrompre temporairement certaines expériences sans devoir les recommencer, et sans compromettre leur validité scientifique. Bien que plus contraignante, cette forme de flexibilité semble particulièrement adaptée aux mécanismes de valorisation explicite.

6.6. Généralisation à d'autres sites

L'étude menée au LNCMI s'inscrit dans le cadre du projet européen FlexRICAN (Flexibility in Research Infrastructures for global Carbon Neutrality). L'objectif à moyen terme est de tester et d'adapter la méthodologie à d'autres infrastructures de recherche européennes, présentant des profils énergétiques, des contraintes expérimentales, et des contextes réseau très variés. Ce passage à l'échelle permettra de valider la robustesse et la transférabilité de l'approche, mais aussi d'identifier des facteurs communs ou spécifiques.

7. CONCLUSIONS

Cette étude explore, dans une approche intégrée, les leviers de flexibilité énergétique et de valorisation de chaleur fatale au sein d'une infrastructure électro-intensive, dans l'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'analyse systémique met en évidence un scénario de replanification permettant une baisse de 27 % des émissions. En tant que travail exploratoire, elle souligne les limites actuelles du modèle, qui ne reflète pas encore certaines contraintes techniques ou contextuelles. Toutes les sources de flexibilité ne sont pas mobilisées, et des améliorations sont possibles pour étendre l'approche systémique, notamment en intégrant les effets

indirects liés à la flexibilité. Si l'étude se concentre sur l'impact carbone, la démarche s'inscrit dans une perspective plus large de durabilité environnementale et sociale, avec pour ambition d'élargir progressivement le périmètre des impacts analysés. Enfin, bien que fondée sur le cas du LNCMI, l'approche développée vise à être transposable à d'autres systèmes multi-énergies, notamment dans le cadre du projet FlexRICAN, afin d'accompagner la transition des infrastructures énergétiques complexes.

8. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien du projet européen FlexRICAN dans le cadre du programme Horizon Europe, ainsi que d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030, portant la référence ANR-22-PETA-0009 pour le projet FlexTASE.

9. REFERENCES

- [1] S. Samadi, M.-C. Gröne, U. Schneidewind, H.-J. Luhmann, J. Venjakob, et B. Best, « Sufficiency in energy scenario studies: Taking the potential benefits of lifestyle changes into account », *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 124, p. 126-134, nov. 2017, doi: 10.1016/j.techfore.2016.09.013.
- [2] A.-L. Dubilly *et al.*, « A 100% renewable electricity mix? Analyses and optimisations Testing the boundaries of renewable energy-based electricity development in metropolitan France by 2050 », report, Ademe ; The International Nuclear Information System (INIS), 2016. Consulté le: 19 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://minesparis-psl.hal.science/hal-01409657>
- [3] M. Baude, M. Herry, B. Mesqui, et I. Richaud, « Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2024 ». Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2024>
- [4] S. Ledur, R. Molinier, F. Sossan, J.-C. Alais, M.-D. El Alaoui Faris, et G. Kariniotakis, « Identification and quantification of the flexibility potential of a complex industrial process for ancillary services provision », *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 212, p. 108396, nov. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108396.
- [5] ADEME, E. LATIMIER, et P. SACHER, « Avis d'expert - Flexibilité du système électrique », mars 2024.
- [6] T. Heggarty, « Techno-economic optimisation of the mix of power system flexibility solutions », phdthesis, Université Paris sciences et lettres, 2021. Consulté le: 10 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.hal.science/tel-03461279>
- [7] E. Kaushik, V. Prakash, O. P. Mahela, B. Khan, A. El-Shahat, et A. Y. Abdelaziz, « Comprehensive Overview of Power System Flexibility during the Scenario of High Penetration of Renewable Energy in Utility Grid », *Energies*, vol. 15, n° 2, p. 516-, 2022, doi: 10.3390/en15020516.
- [8] T. Freire-Barceló, F. Martín-Martínez, et Á. Sánchez-Miralles, « A literature review of Explicit Demand Flexibility providing energy services », *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 209, p. 107953, août 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107953.
- [9] N. K. B. Twum-Duah, « Direct and indirect energy flexibility interactions at the building and community scale: From system to the human-interfaced system ».
- [10] E. Hillberg *et al.*, « Flexibility needs in the future power system ».
- [11] M. Z. Degefa, I. B. Sperstad, et H. Sæle, « Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources », *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 194, p. 107022, mai 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107022.
- [12] Commission mondiale de l'environnement et le développement, *Our Common future*. Oxford New York: Oxford university press, 1987.
- [13] F.-D. Vivien, « Les modèles économiques de soutenabilité et le changement climatique », *Regards Croisés Sur L'économie*, vol. 6, n° 2, p. 75-83, 2009, doi: 10.3917/rce.006.0075.
- [14] Raworth Kate, *Doughnut economics: seven ways to think like a 21st-century economist*. London: Random House Business Books, 2017.
- [15] S. Hodencq *et al.*, « FLEXIBILITY STRATEGIES FOR WASTE HEAT RECOVERY OF AN ELECTRO-INTENSIVE FACILITY ».
- [16] S. Hodencq, M. Brugeron, J. Fitó, L. Morriet, B. Delinchant, et F. Wurtz, « OMEGAAlpes, an Open-Source Optimisation Model Generation Tool to Support Energy Stakeholders at District Scale », *Energies*, vol. 14, n° 18, p. 5928, sept. 2021, doi: 10.3390/en14185928.