



## Science ouverte pour l'optimisation de systèmes énergétiques : des données et modèles ouverts à une infrastructure de recherche ouverte

Sacha Hodencq, Lou Morriet, Frédéric Wurtz, Benoit Delinchant, Benjamin Vincent, François Debray

### ► To cite this version:

Sacha Hodencq, Lou Morriet, Frédéric Wurtz, Benoit Delinchant, Benjamin Vincent, et al.. Science ouverte pour l'optimisation de systèmes énergétiques : des données et modèles ouverts à une infrastructure de recherche ouverte. Conférence IBPSA France, May 2020, Reims, France. hal-03290009

**HAL Id: hal-03290009**

**<https://hal.science/hal-03290009>**

Submitted on 19 Jul 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Science ouverte pour l'optimisation de systèmes énergétiques : des données et modèles ouverts à une infrastructure de recherche ouverte.

Sacha Hodencq<sup>\*1</sup>, Lou Morriet<sup>1</sup>, Frédéric Wurtz<sup>1</sup>, Benoit Delinchant<sup>1</sup>, Benjamin Vincent<sup>2</sup>, François Debray<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP\*, G2Elab, 38000 Grenoble, France  
21 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, France, \*[sacha.hodencq@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:sacha.hodencq@g2elab.grenoble-inp.fr)

---

*RESUME. La valorisation de chaleur fatale apparaît comme un moyen de fourniture de chaleur crédible dans le cadre de la lutte contre le dérèglement climatique, mais qui comprend des défis techniques et organisationnels. Cet article présente le Laboratoire Nationale des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), une infrastructure de recherche engagée dans un projet de valorisation de chaleur fatale. Outre les qualités du projet pour la fourniture de chaleur au quartier où le laboratoire se situe, les travaux menés avec l'outil open source d'aide à la décision pour les systèmes énergétiques - OMEGAAlpes - ont ouvert la voie à deux sites de science ouverte. D'une part une plateforme numérique pour la mise à disposition d'outils d'optimisations de systèmes énergétiques. Cette plateforme a pour but de mettre en contact concepteurs et utilisateurs et d'initier des cercles vertueux pour la capitalisation et la dissémination de connaissances. D'autre part le LNCMI lui-même qui, par les travaux qui y sont menés, est devenu un terrain actif et potentiel au service d'une recherche ouverte et interdisciplinaire.*

*MOTS-CLÉS : Science ouverte, valorisation de chaleur fatale, outil d'optimisation*

---

---

*ABSTRACT. The waste heat recovery appears to be a reliable mean to provide heat in the context of struggle against climate change. This article presents the LNCMI (French Laboratory for High Magnetic Fields), a research facility leading a waste heat recovery project. Beside the qualities of the project regarding the district heat supply, studies carried out with the open source decision support tool for energy systems - OMEGAAlpes - paved the way for two open science sites. On the one hand, an online platform for sharing optimisation tools for energy systems, bringing modellers and users into contact with each other, thus initiating virtuous circle for the capitalisation and dissemination of knowledge. On the other hand, the LNCMI facility itself, which, through the work carried out there, is an active and potential field of experiment in the service of an open and interdisciplinary research.*

*KEYWORDS: Open Science, Waste heat recovery, Optimisation tool.*

---

## 1. INTRODUCTION

La lutte contre le dérèglement climatique est un enjeu majeur de notre siècle et passe par la réduction des émissions de gaz à effet de serre provoquées par la consommation énergétique des activités humaines : celles-ci représentent près de 60% des émissions de dioxyde de carbone à l'échelle mondiale (Ritchie et Roser 2017). En France, la chaleur représente plus de la moitié de la consommation finale d'énergie avec 974 TWh consommés annuellement (« Généralités sur la chaleur - Réseaux de chaleur et territoires » 2011) : trouver et exploiter des sources de production de chaleur peu émettrices de gaz à effet de serre pour remplacer les sources carbonées constitue donc une clef dans la lutte contre le changement climatique. Si des moyens de production de chaleur renouvelable tels que la biomasse, le

solaire thermique ou bien la géothermie existent, la chaleur fatale constitue un gisement de chaleur non-carbonée encore peu exploitée.

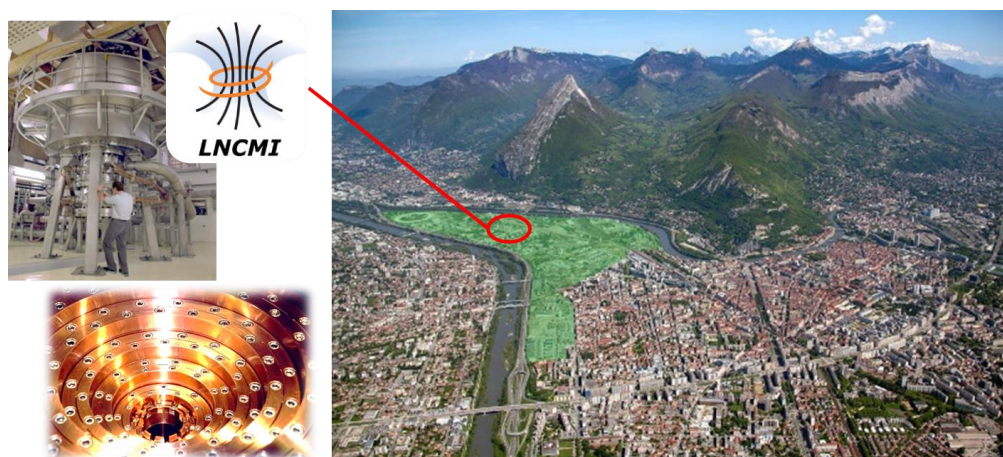
La chaleur fatale est définie comme de la chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée. Le gisement de chaleur fatale issue de sources industrielles en France représente à lui seul près de 110 TWh chaque année (« La chaleur fatale » 2017). A celui-ci viennent s'ajouter d'autres gisements tels que les stations d'épuration, les usines d'incinération d'ordures ménagères ou encore les *data centers*. Si la chaleur fatale représente une alternative intéressante pour le remplacement des énergies fossiles dans le mix énergétique de fourniture de chaleur, sa récupération est soumise à certaines contraintes, et notamment (« La chaleur fatale » 2017; Hampikian 2017) :

- Sa localisation puisque les gisements de chaleur fatale sont souvent diffus sur un territoire et pas nécessairement proches des lieux de consommation de chaleur,
- Sa pérennité face aux durées de vie des infrastructures de récupération et des réseaux de chaleur.
- Son niveau de température qui, s'il est suffisamment élevé, facilitera son exploitation directe ou bien son injection sur les réseaux de chaleur.

A ces problématiques techniques peuvent s'ajouter des freins institutionnels et commerciaux (Frederiksen et Werner 2013).

Dans cet article seront présentés le projet de valorisation de chaleur fatale du Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) et les études associées menées à l'aide de l'outil open source d'optimisation de systèmes énergétiques OMEGAAlpes. Nous argumenterons l'intérêt d'une démarche de science ouverte dans les projets de transition énergétique et présenterons l'émergence de sites de recherche ouverte et interdisciplinaire : une plateforme numérique au service d'une recherche collaborative sur les systèmes énergétiques ainsi que le LNCMI comme infrastructure physique pour une recherche ouverte.

## 2. PROJET DE VALORISATION DE CHALEUR FATALE DU LNCMI : PRESENTATION DES DEFIS ET OPPORTUNITES



*Figure 1 (de gauche à droite) : aimant dans son enceinte, vue du dessus d'un électro-aimant, localisation du LNCMI dans le quartier grenoblois de la Presqu'île. Source : LNCMI - GAM*

Le LNCMI-Grenoble est un grand instrument de recherche du CNRS situé dans le quartier de la Presqu'île à Grenoble (Figure 1). Le champ magnétique produit par ses électroaimants ne travaillant

pas, la totalité de l'énergie injectée dans les aimants est dissipée sous forme de chaleur. Un circuit hydraulique qui prend sa source froide dans une rivière voisine (le Drac) extrait les calories du circuit primaire des aimants via un échangeur puis rejette l'eau réchauffée dans une seconde rivière (l'Isère). L'eau de refroidissement en sortie des aimants a une température variable entre 10°C et 40°C selon le niveau de puissance des aimants et la température du Drac notamment.

Alors qu'une augmentation de la puissance installée du LNCMI est en cours (passage de 24 MW à 30 MW en 2022), un projet de valorisation de chaleur fatale dans la boucle du réseau de chaleur du quartier est à l'étude. Le but est de récupérer la chaleur fatale dissipée par les aimants tout en minimisant l'impact sur le fonctionnement du laboratoire et en garantissant la stabilité du prix de la chaleur pour les usagers du réseau de chaleur. La quantité de chaleur dissipée annuellement par le laboratoire est du même ordre de grandeur que la consommation sur le réseau de chaleur du quartier, qui par ailleurs est dans un processus de diminution de sa température d'opération nominale de 120°C à 85°C : une opportunité pour la valorisation de chaleur fatale basse température issue des aimants. Les différents défis techniques pour la valorisation de chaleur fatale du LNCMI sont présentés dans le Tableau 1.

Différences techniques	LNCMI	Réseau de chaleur
Niveaux de température	Variable 10°C à 40°C	> 85°C
Temporalités de production / consommation	Planning des expériences	Résidentiel - tertiaire
Puissances de production / consommation	Sur l'année : 0 – 30 MW	Été : 0,5 – 2 MW Hiver : 4 – 7 MW

*Tableau 1 : Bilan des différences techniques entre la production de chaleur du LNCMI et la consommation de chaleur sur le réseau du quartier.*

Les solutions techniques envisagées pour pallier ces différences consistent en la mise en place d'une régulation de la température en sortie des aimants, d'une pompe à chaleur et d'un stockage thermique (Hodencq et al. 2019).

En plus de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> entraînée par le remplacement d'énergies carbonées du mix énergétique du réseau de chaleur et le respect des contraintes environnementales de rejets dans les milieux aquatiques environnants, le projet du LNCMI permet de questionner et d'étudier des défis de fond pour la valorisation de chaleur fatale. D'abord la gestion des différences de puissance et de temporalités entre le gisement de chaleur fatale et la consommation sur le réseau. Ensuite, il s'agit ici d'injecter un gisement basse température, ici 35°C, vers un réseau de chaleur moyenne température, ici plus de 85°C. Le cas LNCMI est ainsi représentatif de l'existant en France puisque plus de la moitié du gisement de chaleur fatale industrielle français a un niveau de température inférieur à 100°C, alors même que la grande majorité de la chaleur distribuée sur les réseaux de chaleur en France sont opérés avec des température de plus 85°C (« Les réseaux de chaleur et de froid - Chiffres clés, analyses et évolution » 2019). Enfin le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI est un projet multi-acteur impliquant des infrastructures de recherche (CNRS, CEA Liten), la collectivité locale Grenoble Alpes Métropole (GAM) et l'opérateur du réseau de chaleur de Grenoble (CCIAG) qui est délégataire de service publique. En plus des modèles techniques, le projet permet ainsi de construire des modèles économiques, juridiques et de gouvernance. Ces constructions de modèles sont nécessaires dans la mesure où la mise

en coordination des systèmes techniques demande une adaptation des modes de fonctionnement des acteurs (Hampikian 2017).

Afin d'estimer le potentiel de valorisation de chaleur fatale du LNCMI en intégrant différents objectifs et en le soumettant à des contraintes propres qu'une loi logique de gestion n'était pas capable d'intégrer, l'outil d'aide à la décision OMEGAlpes a été utilisé.

### 3. OMEGAlpes : OUTIL, MODELES ET SCENARIOS OUVERTS

#### 3.1. PRESENTATION GENERALE DE OMEGAlpes

OMEGAlpes est un outil d'aide à la décision pour le dimensionnement et l'opération de systèmes multi-énergies. C'est un modèleur de problème d'optimisation pour systèmes énergétiques utilisant la méthode Mixed Integer Linear Programming (MILP) (Pajot, Morriet, et al. 2019). Il permet notamment de faciliter la phase de conception ou *design time*, i.e. les étapes préliminaires du processus de conception du système énergétique (Wurtz et Delinchant 2017), et d'accumuler les connaissances issues des projets grâce à une formulation par modèles capitalisée au sein de la bibliothèque de l'outil. Il a été développé dans une démarche open source : OMEGAlpes est codé dans le langage Python et mis à disposition sous la licence Apache 2.0 (« Apache License, Version 2.0 » 2004), il est gratuitement téléchargeable via le Python Package Index (PyPI) et est disponible en ligne dans un projet ouvert, versionné et documenté de la plateforme Gitlab<sup>1</sup> afin de favoriser son développement collaboratif. Cela permet en outre de lier les différents articles scientifiques où OMEGAlpes est utilisé au code source des modèles associés dans une approche de recherche reproductible. Les modèles développés sont également disponibles via l'utilisation de Jupyter Notebooks (que l'on nommera notebooks par la suite), des fichiers de code expliqués en détail et directement partageables, utilisables et modifiables par application web (« Project Jupyter » s. d.). De manière générale, les notebooks OMEGAlpes sont pensés à des fins pédagogiques pour de la compréhension et de l'enseignement. Tout comme les modèles OMEGAlpes, ils ne remplacent pas l'expertise métier mais permettent l'exploration de scénarios énergétiques via des études préliminaires par et pour les acteurs impliqués. La constitution de ces modèles permet ainsi de définir et de discuter les objectifs et contraintes et peuvent donner lieu à différents systèmes techniques, organisation pratique ou pilotage. L'estimation de potentiel en fonction des objectifs et contraintes permet en outre une meilleure compréhension et donc un meilleur dialogue avec l'expert, par l'identification des degrés de liberté, des verrous, et la recherche de solution préalable.

#### 3.2. OMEGAlpes APPLIQUE A LA VALORISATION DE CHALEUR FATALE DU LNCMI

OMEGAlpes a déjà permis de mener de nombreux travaux autour du projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI, à commencer par la planification des expériences du laboratoire sous contraintes environnementales, économiques ou sociales (Pajot et al. 2018; Pajot 2019), et l'étude de la flexibilité des profils de consommation du LNCMI à partir de l'identification d'expériences types (Pajot, Nguyen, et al. 2019). Ensuite, une optimisation multi-acteur appliquée à la valorisation de la chaleur fatale du LNCMI (Morriet et al. 2018) a été menée et s'intègre dans le développement d'un module OMEGAlpes destiné à favoriser les discussions entre les parties prenantes autour des solutions ainsi qu'autour du modèle lui-même, afin que l'outil d'optimisation puisse participer au processus de décision entre plusieurs acteurs. L'influence de la thermo-hydraulique des systèmes de refroidissement des électro-

<sup>1</sup> GIT repository OMEGAlpes : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes>

aimants du LNCMI sur les bilans économiques et environnementaux du LNCMI a également été étudiée (Hodencq et al. 2019), et les derniers travaux concernent la comparaison entre optimisations basées sur des critères énergétique et exergetique, qui donneront également lieu à un module OMEGAlpes dédié à l'exergie (Fitó et al. 2020).

### 3.3. UTILISATION DIRECTE DE OMEGAlpes : LE “NOTEBOOK” LNCMI

Nous proposons dans cet article un notebook sur le cas LNCMI. Le notebook LNCMI est directement accessible et exécutable via la plateforme Mybinder<sup>2</sup>. Ce notebook représente un scénario au sens de l'*OpenEnergyPlatform* (Hülk et al. 2018) et inclut :

- la question de recherche : ici observer l'opération d'un dimensionnement de système de valorisation sous contrainte sur une durée de deux semaines,
- les hypothèses de travail détaillées, telles que l'approximation d'une loi d'eau pour le réseau de chaleur ou le travail à COP constant pour les pompes à chaleur ; et en outre les contraintes et l'objectif de maximisation de la chaleur valorisée à dimensionnement fixé,
- des jeux de données : courbe de charge réelle du LNCMI, données de consommation du réseau de chaleur reconstruites (pour garantir l'anonymisation des données), et les données de températures extérieures,
- le modèle énergétique OMEGAlpes dont le code est accessible et dont l'utilisation est ici simplifiée par une interface utilisateur.

Ainsi, les études menées avec OMEGAlpes et le notebook mis à disposition sur le cas de valorisation de chaleur fatale du LNCMI s'inscrivent dans une démarche de science ouverte, et sont les premières pierres d'une plateforme collaborative de recherche ouverte qui pourrait prendre des formes numérique et physique au LNCMI.

## 4. VERS UNE PLATEFORME COLLABORATIVE DE RECHERCHE OUVERTE

### 4.1. SCIENCE OUVERTE POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE : LE CAS DU LNCMI

Le développement de systèmes énergétiques décentralisés peu émetteurs de gaz à effet de serre et l'effort de valorisation de chaleur fatale donnent lieu à de nouveaux défis pour la conception et la gestion des systèmes énergétiques tels que la gestion d'intermittence. Les modèles énergétiques permettent aux chercheurs, aux citoyens et aux autorités publiques de comprendre et traiter ces nouveaux enjeux. Il est aujourd'hui crucial de rendre les données et les modèles énergétiques ouverts, et ce pour différentes raisons (Pfenninger et al. 2017; Morrison 2018) :

- Disposer d'une science de meilleure qualité par la transparence et la vérification par les pairs, évitant les erreurs ou même la fraude. Une recherche ouverte et reproductible diminue par ailleurs les efforts parallèles, faisant ainsi avancer la science de manière générale ainsi que les chercheurs dont les travaux sont utilisables et utilisés.
- Rendre plus efficaces les relations entre sciences et politiques là où l'ouverture des modèles et des données est de plus en plus réclamée par les instances publiques ; travailler de manière ouverte permet le partage quantitatif des tâches ainsi que des méthodes entre milieux scientifiques et politiques.

<sup>2</sup> Lien exemples / notebooks / LNCMI OMEGAlpes : [https://mybinder.org/v2/git/https%3A%2F%2Fgitlab.univ-grenoble-alpes.fr%2Fomegalpes%2Fomegalpes\\_examples/master](https://mybinder.org/v2/git/https%3A%2F%2Fgitlab.univ-grenoble-alpes.fr%2Fomegalpes%2Fomegalpes_examples/master).



- Apporter de la fiabilité aux arguments scientifiques dans le débat public autour de la transition énergétique via leur transparence.
- Rendre publique la recherche financée par de l'argent public, comme récemment préconisé en France par la Loi pour une République Numérique (*LOI n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique* 2016) et en Europe via la création de l'*Open Science Policy Platform* exigeant l'accès ouvert pour les projets H2020 (European Commission 2016; Glinos 2019).

En outre les démarches de science ouverte peuvent permettre l'implication citoyenne dès les premières étapes des projets de transition énergétique, ce qui a été identifié comme une clé de réussite pour ceux-ci (Roth et al. 2017).

Mais la mise en place de démarche de science ouverte fait face à des verrous : en plus des raisons valides de respect de la vie privée pour les données, une dimension culturelle et sociale est à l'œuvre avec une inertie face aux changements d'habitudes, surtout en l'absence d'incitation à l'ouverture de la part des instances dirigeantes, et une peur de l'exposition des travaux. Ainsi de nombreuses études soulignent le manque de transparence des études dans le domaine de l'énergie (Cao et al. 2016; Pfenninger et al. 2017). Pourtant le partage ouvert permet comme on l'a vu, une meilleure revue par les pairs, la propriété intellectuelle est assurée par les citations vers les travaux, et le coût en temps peut être réduit si des outils appropriés sont utilisés. Enfin, les outils ouverts offrent une garantie d'usage sur le long terme car les sources restent toujours accessibles.

Ces intérêt et verrous de la science ouverte prennent forme au LNCMI. Les modèles OMEGAAlpes ainsi que les données de consommation électrique et donc de production de chaleur du LNCMI sont ouverts et partagés pour tous les acteurs, et permettent la discussion des objectifs et contraintes mais aussi du système technique et de son opération entre les acteurs du gisement de chaleur (LNCMI), l'autorité locale (Grenoble Alpes Métropole) et le délégataire de service public à la gestion du réseau de chaleur (CCIAG). Ces données et modèles ouverts permettent en outre la participation d'autres laboratoires dans le projet tels que le LOCIE à Chambéry pour les études exergétiques (Fitó et al. 2020). On note toutefois l'absence d'exigence de science ouverte de la part de l'autorité publique locale, et les freins de fermeture de la part de l'expert réseau de chaleur pour des raisons de confidentialité éthique en ce qui concerne les données, et de propriété intellectuelle pour les modèles.

#### 4.2. PLATEFORME NUMERIQUE DE SCIENCE OUVERTE POUR LES SYSTEMES ENERGETIQUES

Des plateformes numériques ouvertes mettant à disposition les données et modèles énergétiques peuvent permettre de répondre aux enjeux de transparence et de reproductibilité (Pfenninger et al. 2018). Des méthodologies existent (Cao et al. 2016) et ont été mises en applications pour quantifier la transparence, la reproductibilité et la qualité des démarches de science ouverte : un travail d'auto-évaluation est en effet primordial dans ce domaine. La mise en place de fiches de spécifications (*fact sheets*) pour les outils, les modèles et les scénarios, présentant une représentation claire, compréhensible et disponible des modèles, permet par exemple d'améliorer significativement la transparence (Hülk et al. 2018).

La Figure 3 présente ainsi des concepts essentiels pour la diffusion d'un projet open source à partir d'une plateforme numérique. Des outils open source documentés et versionnés constituent une base là où des tutoriels vont permettre de rapidement saisir les fonctionnalités et usages des modèles (Pfenninger et al. 2018). Un environnement d'exécution permettra un usage direct des outils (Boettiger 2015). Enfin

des moyens de socialisation synchrone ou asynchrones tels que des forums, s'ils sont utilisés par une communauté suffisamment large, permettent de mettre en relation les communautés de concepteurs et d'utilisateurs de modèles énergétiques et donc de capter et diffuser aussi bien les connaissances explicites que tacites (Wurtz et al. 2012). De telles plateformes permettent la création de communautés, la transparence et légitimité des études et la participation. Des réseaux d'acteurs peuvent alors se former entre ces plateformes tels que Openmod (Morrison 2019a; 2019b).

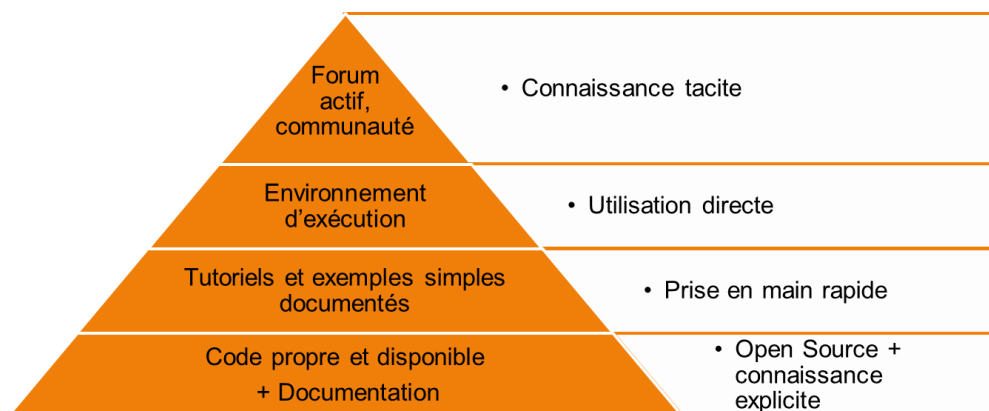


Figure 3 : Concepts de base pour la diffusion d'une plateforme open source. Source: Auteur

#### 4.3. PLATEFORME NUMERIQUE OUVERTE POUR L'OPTIMISATION ENERGETIQUE : COFFEE

Suite aux travaux menés avec OMEGAAlpes, notamment sur le cas LNCMI, une plateforme numérique ouverte émerge au G2Elab : COFFEE pour Collaborative Open Framework For Electrical Engineering. Cette plateforme permettra de mettre à disposition en open source et en Freeware selon les degrés de Propriété Intellectuelle en jeu, les outils développés au laboratoire : on peut citer OMEGAAlpes bien sûr mais également NoLOAD<sup>3</sup>, un outil d'optimisation non-linéaire pour la conception de systèmes et composants énergétiques utilisant la différenciation automatique. Outre cette mise à disposition, la plateforme a pour objectif de rendre les modèles directement utilisables, de mettre en relation les concepteurs et utilisateurs de modèles et d'augmenter la part de connaissance explicite et formalisable, reprenant ainsi l'héritage de la plateforme DIMOCODE (Wurtz et al. 2012). Ces objectifs prennent forme dans les bibliothèques de modèles et les documentations associées, des notebooks explicités pour des tutoriels et exemples simples directement utilisables, et un forum à venir pour la socialisation asynchrone et l'échange de connaissances tacites. Les plateformes numériques ouvertes pourraient bien être les nouveaux fers de lance des laboratoires, présentant des outils d'optimisation et de modélisation énergétique ouverts et génériques. Elles devront aller de pair avec des cas d'étude appropriables et localisés.

#### 4.4. LE LNCMI COMME INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE OUVERTE INTERDISCIPLINAIRE

Le LNCMI est une infrastructure de recherche ouverte et collective par essence : le laboratoire met à disposition des chercheurs du monde entier son installation : si chacun avait dû mettre en place ses propres électro-aimants pour champs magnétiques intenses, les avancées du domaine seraient bien moindre (parallèle avec le CERN de (Pfenninger et al. 2017)).

En plus des travaux autour des champs magnétiques intenses, le laboratoire se place comme un terrain d'étude pour la pérennité des grandes infrastructures de recherches par sa contribution à la

<sup>3</sup> GITlab repository NoLOAD : [https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/design\\_optimization/noload](https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/design_optimization/noload)



flexibilité du réseau électrique auprès de RTE via un opérateur d'agrégation, et son projet de valorisation de chaleur fatale qui l'inscrit dans le territoire. Son statut d'infrastructure de recherche et la mise à disposition de ses données lui donnent un statut unique rendant possible l'observation, la compréhension, et la construction de solutions interdisciplinaires :

- Techniques d'abord avec une variété de thèmes abordés allant de la micro-fluidique avec le refroidissement par ébullition nucléée, jusqu'à la valorisation de chaleur fatale à l'échelle d'un quartier, en plus de travaux sur la flexibilité et les services au réseau électrique. C'est un terrain d'application actif pour des outils d'optimisation énergétique open source, des concepts tels que l'exergo-économie et pour l'enseignement, en plus d'être un terrain potentiel pour d'autres outils de modélisation énergétique et pour des essais à échelle 1 de systèmes techniques tels que des pompes à chaleur ou stockages innovants. Ces essais favoriseraient des collaborations entre recherche et industrie et n'auraient pas d'impact sur le système technique mature utilisé pour la valorisation de chaleur car seule la chaleur excédentaire serait utilisée.
- Sur un spectre plus large, le LNCMI est un terrain pour des évaluations économiques sur le potentiel de flexibilité de consommation électrique notamment avec le laboratoire GAEL, ainsi que la construction de modèles juridiques ouverts pour les projets de transition énergétique. Des travaux en sciences humaines et sociales, dont l'importance est capitale sur les projets de valorisation de chaleur fatale (Hampikian 2017), y sont également menés tels que la modélisation d'assemblages multi-acteurs (Morriet, Debizet, et Wurtz 2019) ainsi que des travaux à venir avec l'implication du jeune programme de recherche ANR Récuperte et la participation au sein du programme de recherche interdisciplinaire de l'Université Grenoble Alpes Eco-SESA.

Le LNCMI peut donc bien être considéré comme une infrastructure de recherche ouverte et interdisciplinaire, qui pourrait au même titre que les outils et plateformes numériques open source, rejoindre ou initier un réseau de plateformes physiques de science ouverte, qui viendraient incarner les réseaux de plateformes de données et modèles ouverts déjà existants.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article nous avons présenté le LNCMI, une infrastructure de recherche engagée dans un projet de valorisation de chaleur fatale. Outre les qualités propres du projet pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la fourniture de chaleur du quartier, les travaux menés avec l'outil OMEGAAlpes ont ouvert la voie à la création de deux sites de science ouverte : une plateforme numérique pour la mise à disposition d'outils d'optimisations de systèmes énergétiques, mettant au contact les concepteurs et utilisateurs et initiant des cercles vertueux pour la capitalisation et la dissémination de connaissances ; et l'installation du LNCMI elle-même qui par les travaux qui y sont menés est un terrain actif et potentiel au service d'une recherche ouverte et interdisciplinaire. La poursuite des études à l'intersection de ces sites sur la valorisation de chaleur fatale ou bien de flexibilité électrique du LNCMI, ainsi que la mise en place de processus d'auto-évaluation quant à la transparence et l'ouverture de ces sites sont autant de perspectives à venir.

## 6. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien du CDP Eco-SESA<sup>4</sup> recevant des financements de l'Agence Nationale de la Recherche, au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-15-IDEX-02.

Les auteurs souhaitent également remercier la cellule énergie du CNRS pour son accompagnement à travers le projet Opepsselfi.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- « Apache License, Version 2.0 ». 2004. Apache. <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0.html>.
- Boettiger, Carl. 2015. « An introduction to Docker for reproducible research ». *ACM SIGOPS Operating Systems Review* 49 (1): 71–79. <https://doi.org/10.1145/2723872.2723882>.
- Cao, Karl-Kiên, Felix Cebulla, Jonatan J. Gómez Vilchez, Babak Mousavi, et Sigrid Prehofer. 2016. « Raising awareness in model-based energy scenario studies—a transparency checklist ». *Energy, Sustainability and Society* 6 (1): 28. <https://doi.org/10.1186/s13705-016-0090-z>.
- European Commission. 2016. « Open Science Policy Platform (OSPP) | Open Science - Research and Innovation ». 2016. <https://ec.europa.eu/research/openscience/index.cfm?pg=open-science-policy-platform>.
- Fitó, Jaume, Sacha Hodencq, Julien Ramousse, Frédéric Wurtz, Benoit Stutz, François Debray, et Benjamin Vincent. 2020. « Energy- and Exergy-Based Optimal Designs of a Low-Temperature Industrial Waste Heat Recovery System in District Heating ». *Energy Conversion and Management* 211 (mai): 112753. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112753>.
- Frederiksen, Svend, et Sven Werner. 2013. « Heat recycling from industrial processes ». In *District Heating and Cooling*, 195-203. Studentlitteratur.
- « Généralités sur la chaleur - Réseaux de chaleur et territoires ». 2011. mars 2011. <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/generalites-sur-la-chaleur>.
- Glinos, Konstantinos. 2019. « Open Science ». European Union. [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research\\_and\\_innovation/knowledge\\_publications\\_tools\\_and\\_data/documents/ec\\_rtd\\_factsheet-open-science\\_2019.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/knowledge_publications_tools_and_data/documents/ec_rtd_factsheet-open-science_2019.pdf).
- Hampikian, Zélia. 2017. « Distribuer la chaleur fatale des entreprises : la construction dynamique d'un réseau d'énergie décarbonée, entre flux et infrastructure ». *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, n° Vol. 8, n°2 (juillet). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11736>.
- Hodencq, Sacha, François Debray, Christophe Trophime, Benoit Stutz, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz, Lou Morriet, et al. 2019. « Thermohydraulics of High Field Magnets: from microns to urban community scale ». In *24ème Congrès Français de Mécanique*. Brest.
- Hülk, Ludwig, Berit Müller, Martin Glauer, Elisa Förster, et Birgit Schachler. 2018. « Transparency, Reproducibility, and Quality of Energy System Analyses – A Process to Improve Scientific Work ». *Energy Strategy Reviews* 22 (novembre): 264-69. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.014>.
- « La chaleur fatale ». 2017. ADEME. [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur\\_fatale-8821-2018-06\\_pdf.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur_fatale-8821-2018-06_pdf.pdf).
- LOI n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique. 2016. 2016-1321.
- Morriet, Lou, Gilles Debizet, et Frederic Wurtz. 2019. « Multi-Actor Modelling for MILP Energy Systems Optimisation: Application to Collective Self-Consumption », 8.
- Morriet, Lou, Camille Pajot, Benoit Delinchant, Yves Marechal, Frédéric Wurtz, François Debray, et Benjamin Vincent. 2018. « Optimisation multi-acteurs appliquée à la valorisation de chaleur fatale d'un acteur industriel flexible », 8.

<sup>4</sup> Site internet de Eco-SESA : <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/>

- Morrison, Robbie. 2018. « Energy System Modeling: Public Transparency, Scientific Reproducibility, and Open Development ». *Energy Strategy Reviews* 20 (avril): 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.010>.
- . 2019a. « An Online Community for Open Energy Analysis ». Présenté à EMP-E 2019 meeting, Brussels, Belgium.
- . 2019b. « An Open Energy System Modeling Community ». Text. <https://Genr.Eu/Wp/>. 20 novembre 2019. <https://genr.eu/wp/an-open-energy-system-modeling-community/>.
- Pajot, Camille. 2019. « OMEGAlpes : Outil d'aide à la décision pour une planification énergétique multi-fluides optimale à l'échelle des quartiers ». Université Grenoble Alpes.
- Pajot, Camille, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, Frederic Wurtz, Lou Morriet, Benjamin Vincent, et François Debray. 2018. « Industrial Optimal Operation Planning with Financial and Ecological Objectives »: In *Proceedings of the 7th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, 214-22. Funchal, Madeira, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0006705202140222>.
- Pajot, Camille, Lou Morriet, Sacha Hodencq, Benoît Delinchant, Yves Maréchal, Frédéric Wurtz, et Vincent Reinbold. 2019. « An Optimization Modeler as an Efficient Tool for Design and Operation for City Energy Stakeholders and Decision Makers ». In *Building Simulation 2019*. Rome, Italy. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285954>.
- Pajot, Camille, Quang Nguyen, Benoît Delinchant, Yves Maréchal, Frédéric Wurtz, Stephane Robin, Benjamin Vincent, et Francois Debray. 2019. « Data-driven Modeling of Building Consumption Profile for Optimal Flexibility: Application to Energy Intensive Industry ». In *Building Simulation Conference 2019*. Rome, Italy. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02364669>.
- Pfenninger, Stefan, Joseph DeCarolis, Lion Hirth, Sylvain Quoilin, et Iain Staffell. 2017. « The Importance of Open Data and Software: Is Energy Research Lagging Behind? » *Energy Policy* 101 (février): 211-15. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.046>.
- Pfenninger, Stefan, Lion Hirth, Ingmar Schlecht, Eva Schmid, Frauke Wiese, Tom Brown, Chris Davis, et al. 2018. « Opening the Black Box of Energy Modelling: Strategies and Lessons Learned ». *Energy Strategy Reviews* 19 (janvier): 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.002>.
- « Project Jupyter ». s. d. Consulté le 11 mars 2020. <https://www.jupyter.org>.
- Ritchie, Hannah, et Max Roser. 2017. « CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions ». *Our World in Data*, mai. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- Roth, A., V. Gerbaud, M. Boix, et L. Montastruc. 2017. « Holistic Framework for Land Settlement Development Project Sustainability Assessment: Comparison of El Hierro Island Hydro Wind Project and Sivens Dam Project ». *Computers & Chemical Engineering* 100 (mai): 153-76. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.02.002>.
- Wurtz, Frédéric, et Benoît Delinchant. 2017. « “Smart Buildings” Integrated in “Smart Grids”: A Key Challenge for the Energy Transition by Using Physical Models and Optimization with a “Human-in-the-Loop” Approach ». *Comptes Rendus Physique, Demain l'énergie*, 18 (7): 428-44. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.09.007>.
- Wurtz, Frédéric, Benoît Delinchant, Laurence Estrabaut, et Franck Pourroy. 2012. « Vers de nouvelles approches théoriques et pratiques pour la capitalisation des connaissances et la mise en réseau des compétences autour des modèles numériques pour le bâtiment: l'approche DIMOCODE ». In *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA*. Chambéry.