



HAL
open science

Méthodes et outils pour un processus de modélisation collaboratif et ouvert des systèmes énergétiques

Sacha Hodencq

► **To cite this version:**

Sacha Hodencq. Méthodes et outils pour un processus de modélisation collaboratif et ouvert des systèmes énergétiques. Energie électrique. Université Grenoble Alpes, 2022. Français. NNT: . tel-03809331v1

HAL Id: tel-03809331

<https://hal.science/tel-03809331v1>

Submitted on 10 Oct 2022 (v1), last revised 5 Jan 2023 (v2)

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : EEATS - Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal (EEATS)

Spécialité : GENIE ELECTRIQUE

Unité de recherche : Laboratoire de Génie Electrique

Méthodes et outils pour un processus de modélisation collaboratif et ouvert des systèmes énergétiques

Methods and tools for a collaborative and open energy modelling process

Présentée par :

Sacha HODENCQ

Direction de thèse :

Frédéric WURTZ

Directeur de thèse

Benoît DELINCHANT

Co-directeur de thèse

Rapporteurs :

Arnaud HUBERT

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Université de Technologie de Compiègne

Salvy BOURGUET

MAÎTRE DE CONFÉRENCES, Université de Nantes

Thèse soutenue publiquement le **23 septembre 2022**, devant le jury composé de :

Frédéric WURTZ

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS Délégation Alpes

Directeur de thèse

Arnaud HUBERT

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Université de Technologie de Compiègne

Rapporteur

Salvy BOURGUET

MAÎTRE DE CONFÉRENCES, Université de Nantes

Rapporteur

Benoît DELINCHANT

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Grenoble INP

Co-directeur de thèse

Tatiana REYES CARRILLO

MAÎTRE DE CONFÉRENCES, Université de technologie de Troyes

Examinatrice

Jean-François BOUJUT

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Grenoble INP

Président

Pierre HAESSIG

MAÎTRE DE CONFÉRENCE, CentraleSupélec

Examineur

Robin GIRARD

CHARGÉ DE RECHERCHE, Mines Paris - PSL - Centre PERSEE

Examineur



Sommaire

Sommaire	2
Remerciements.....	5
Glossaire	6
Abréviations	6
Terminologies	7
Matériels supplémentaires	9
Introduction générale.....	12
Chapitre I Ouverture des connaissances dans le milieu de l'énergie : définitions et enjeux 14	
Résumé du chapitre.....	15
I.1. Modélisation énergétique face aux enjeux socio-écologiques.....	16
I.2. De la science ouverte à la modélisation énergétique ouverte	21
I.3. Spécificités de l'ouverture des connaissances dans le domaine de l'énergie.....	31
I.4. Bilan.....	42
Chapitre II Les outils et pratiques de modélisation énergétique ouverte	44
Résumé du chapitre.....	45
II.1. Comment s'incarne la modélisation énergétique ouverte	46
II.2. Ouvrir la modélisation énergétique : quoi et comment ?	46
II.3. Stratégie de développement des outils de modélisation énergétique	52
II.4. Reproductibilité des processus de modélisation énergétique ouverte	69
II.5. Bilan.....	78
Chapitre III La méthode ORUCE (Open and Reproducible Use Case For Energy) - Rendre les pratiques de science ouverte accessibles aux acteurs de l'énergie par le biais des cas d'étude 79	
Résumé du chapitre.....	80
III.1. Des pratiques aux processus de modélisation énergétiques ouvertes.....	81
III.2. La méthode ORUCE : ouvrir le processus de modélisation énergétique	81
III.3. Discussion et éléments de validation de la méthode ORUCE	96
III.4. Bilan et perspectives.....	102
Chapitre IV Ouverture et collaboration dans la conception de projets de transition énergétique locaux	104
Résumé du chapitre.....	105
IV.1. Thématiques et cas d'études	106

IV.2.	Ouverture d'un processus de modélisation énergétique en phase d'esquisse de conception : projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI	106
IV.3.	Processus de modélisation énergétique ouvert au service de la recherche et de la médiation auprès des communautés énergétiques : le cas de l'autoconsommation photovoltaïque.....	127
IV.4.	Bilan et perspectives.....	146
Chapitre V	Une plateforme de modélisation énergétique ouverte et collaborative au service des acteurs de la transition : COFFEE (Collaborative Open Framework For Energy Engineering)	149
	Résumé du chapitre.....	150
V.1.	Des connaissances utiles, utilisables et utilisées ?.....	151
V.2.	Plateformes collaboratives pour la modélisation énergétique ouverte	151
V.3.	COFFEE : Collaborative Open Framework For Energy Engineering	158
V.4.	Bilan et perspectives.....	180
	Conclusion générale.....	182
	Perspectives.....	185
	Publications	188
	Bibliographie.....	191
	Table des matières détaillée	220
	Annexes.....	227
Annexe 1	- Corrélation entre action de lutte contre le changement climatique dans le milieu de l'énergie, et ODD.	228
Annexe 2	- Open Source ou Free Software ?	229
Annexe 3	- Modes de partage d'articles en libre accès	229
Annexe 4	- Ouverture des données de l'IEA	230
Annexe 5	- Historique de la responsabilité de la recherche	236
Annexe 6	- Tableau détaillé d'outils de modélisation énergétique.....	237
Annexe 7	- Positionnement de OMEGAAlpes par rapport aux autres outils de modélisation énergétique ouverts.....	241
Annexe 8	- Détail concernant les environnements encapsulés.....	242
Annexe 9	- Espace de conception des notebooks, Lau et al.	244
Annexe 10	- Notebook ORUCE autoconsommation PV.....	246
Annexe 11	- Fiche synthétique pour le cas d'étude autoconsommation PV.....	249
Annexe 12	- Template pour ORUCE	250
Annexe 13	- Diagramme ORUCE médiation.....	256

Annexe 14	- Note stratégie open data LNCMI.....	256
Annexe 15	- Tableau récapitulatif des productions avec OMEGAlpes dans le cadre du projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI.....	260
Annexe 16	- Tableau récapitulatif des productions avec OMEGAlpes autour de l'autoconsommation PV	261
Annexe 17	- Détail des résultats associés au point de la courbe de Pareto entre émissions de GES et LCF	262
Annexe 18	- Système énergétique complet du spectacle ONIRI 2070	262
Annexe 19	- Formulaire de contribution dans COFFEE	263
Annexe 20	- Description des niveaux et critères de l'enquête CAUTIC.....	265
Annexe 21	- Résultats détaillés de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE.....	267
Annexe 22	- Scénarios d'usage de COFFEE.....	270
Table des figures	.....	290
Table des tableaux	.....	294
Résumé	.....	296
Abstract	.....	296

Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans les multiples personnes qui l'ont et m'ont accompagné et soutenu.

Je tiens d'abord à remercier Fred & Benoit pour l'encadrement très complémentaire durant ces trois années, et même pourrait-on dire, l'accompagnement depuis bientôt cinq ans ! Fred pour ta curiosité, ton ouverture et ton enthousiasme sur des sujets très variés, ce qui a vraiment participé à ouvrir les horizons du sujet de thèse. Benoit, également pour ton ouverture, mais aussi ta disponibilité et ton réalisme qui ont permis de concrétiser les horizons ouverts.

J'aimerais également remercier celles et ceux qui ont partagé mon bureau durant ces années et avec qui j'ai pu avoir de très bons échanges : Camille, Lou, Mathieu, ou plus récemment Juliette, Seun, Etienne, Tiansi, Hung et bien d'autres. Également l'équipe Eco-SESA : Thibaut, Pierre, Marta, Jessica, Gilles. Merci à vous pour le temps passé ensemble, et pour avoir traversé ces années à mes côtés.

Également merci aux compagnons de travail, au laboratoire : Jaume, Nana, Jonathan ; au LNCMI François & Benjamin ; Théo & Fabrice à Innovacs et également la communauté *openmod* avec en particulier Robbie Morrison ; et également le CoSO. Ce travail n'aurait pas été possible sans vous, et a gagné une grande richesse grâce à vos apports. Et puis merci à celles et ceux avec qui je prépare la suite : Romain, Christophe, Mathilde, Hugo, Aude, ...

Merci à la petite équipe Low-Tech, notamment Kévin & Martial, Sophie, pour le partage d'envies, d'énergie, d'émotions, et le travail comme les bons moments passés ensemble. Et aussi l'équipe LowTRE, notamment Manu, Alexandre, Guillaume et les autres. Et merci à l'équipe enseignement : Delphine, Laurent, et bien sûr Fanny, Laurent et tous les étudiants et enseignants du super parcours PISTE.

Enfin, des remerciements plus personnels : merci aux copains de Grenoble, ceux que je me suis fait en école d'ingénieur, et avec qui on continue d'entretenir des rapports tout à fait *cordiaux* de manière régulière (*#Western*) : c'est toujours un plaisir de se retrouver. Merci aussi à ceux que j'ai découvert après les études (*#Antibobine*), et grâce à qui la vie grenobloise est bien douce. Merci aux Monkey avec qui je lance, je cours et surtout, je rigole. Merci aux copains de toujours, par chronologie inversée : Elliott, Nico, Théo, Émile, Julia, Enzo (*#LLcity*).

Merci à Zoé qui a été là et a su entretenir le lien entre nous dans les très bons moments comme dans les plus délicats. Merci à mes parents, à ma sœur, et à famille qui m'offrent un support et un amour indéfectible.

Sincèrement, merci à toutes et tous.

PS : si vous ne vous retrouvez pas dans ces remerciements mais pensez devoir y apparaître, c'est vous qui avez raison et non le rédacteur de ces quelques mots dont la mémoire a pu flancher au moment de les écrire.

Glossaire

Abréviations

- ACV : Analyse de Cycle de Vie
- ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (nouvellement Agence de la transition écologique)
- AIE : Agence Internationale de l'Energie
- ANR : Agence Nationale de la Recherche
- BE : Bureaux d'Études
- CAPEX : Capital Expenditure
- CAUTIC : Conception Assistée par l'Usage, pour les Technologies, l'Innovation et le Changement
- CCIAG : Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise
- CEA – Liten : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives – Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux
- CNES : Centre national d'études spatiales
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
- COFFEE : Collaborative Open Framework For Energy Engineering
- CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
- DHI : Diffuse Horizontal Irradiance
- DNI : Direct Normal Irradiance
- DoD : Depth of Discharge
- Eco-SESA : programme de recherche interdisciplinaire de l'UGA (Eco-districts Safe, Efficient, Sustainable and Accessible energies).
- ECSA : European Citizen Science Association
- EDF : Électricité De France
- EnR : Énergies Renouvelables
- ENSAG : École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble
- FAIR : Findable, Accessible, Interoperable, Reusable.
- FAQ : *Frequently Asked Questions* ou Foire Aux Questions
- FSFE : Free Software Foundation Europe
- G2Elab : Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (Grenoble Electrical Engineering Laboratory).
- GAEL : Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble
- GAM : Grenoble Alpes Métropole
- GES : Gaz à Effet de Serre
- GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (*IPCC* en anglais)
- GWP : Potentiel de réchauffement global (*Global Warming Potential*),
- INNOVACS : Fédération de Recherche "Innovation, Connaissances, Société".
- IRD : Institut de Recherche pour le Développement
- LCF : Load Cover Factor
- Li-ion : Lithium Ion (à propos de batteries)
- LNCMI : Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
- LOCIE : Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement
- MIAGE : Master Méthode Informatique Appliquées à la Gestion des Entreprises
- MDA : Model Driven Architecture
- NSS : Natural Self-Sufficiency
- ODD : objectifs de développement durable
- OMS : Organisation mondiale de la santé

- ONU : Organisation des Nations Unies
- OPEX : Operational Expenditure
- ORUCE : Open and Reproducible Use Case for Energy
- PAC : Pompe à Chaleur
- PACTE : laboratoire de sciences sociales de Grenoble
- PV : photovoltaïque
- RGPD : Règlement Général sur la Protection des Données
- RTE : Réseau de Transport d'Électricité
- SCF : Supply Cover Factor
- UDL : Université De Lyon
- UGA : Université Grenoble-Alpes
- UNESCO : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
- VRE : Virtual Research Environment

Terminologies

- Code source : code écrit par un auteur humain [1].
- Epistémologie : étude de la constitution de la connaissance
- Forge logicielle : Environnement de développement logiciel facilitant le travail collaboratif autour d'un projet logiciel. Une forge contient des outils tels que : dépôt versionné de code source, forums de discussion, environnement de tests automatisés, etc [1].
- git : logiciel libre de gestion de versions décentralisé
- Langage informatique : langage spécifiquement conçu pour décrire des processus calculatoires susceptibles d'être effectués par un ordinateur [1].
- Langage machine : langage rudimentaire de bas niveau permettant d'écrire du code directement exécutable par un ordinateur d'un type donné. Les programmeurs préfèrent écrire leurs codes sources dans des langages de plus haut niveau, plus expressifs. Les codes source doivent alors être traduits en code objet exécutable sur cet ordinateur, notamment par compilation [1].
- Licence : document contractuel par lequel l'ayant droit d'une œuvre accorde un certain nombre de permissions à l'utilisateur. Une licence est dite « libre » si elle offre simultanément les « 4 libertés » : d'usage, de copie, de modification et de redistribution du logiciel modifié [1].
- Logiciel : texte, écrit dans un ou plusieurs langages informatiques, décrivant des calculs destinés à être exécutés par un ordinateur [1].
- Markdown : langage de balisage léger offrant une syntaxe facile à lire et à écrire.
- Médiation scientifique : rendre les connaissances scientifiques accessibles et l'activité compréhensible. Ce en réponse à une demande sociétale, avec des démarches participatives impliquant le public et discutant les choix et valeurs [2].
- Métadonnées : données associées à une ou plusieurs données afin de les contextualiser (horodatage et géo-localisation d'une photo, par exemple) [1].
- Modèle énergétique : ensembles mathématiques cohérents comprenant un ensemble d'équations pour analyser les phénomènes d'un système complexe
- Modélisation énergétique : définition section I.1.3
- Notebook : Jupyter Notebook, document contenant des cellules pouvant contenir du code, du texte (à l'aide de Markdown), des formules mathématiques, des graphiques et des médias interactifs [1].
- Objet frontière : Objets, abstraits ou concrets, dont la structure est suffisamment commune à plusieurs mondes sociaux pour qu'elle assure un minimum d'identité au niveau de l'intersection tout en étant suffisamment souple pour s'adapter aux besoins et contraintes spécifiques de chacun de ces mondes. » [3]

- Outil de modélisation énergétique : outils informatiques ou formalismes de modélisation qui génèrent des modèles.
- Scénario ou cas d'étude de modélisation énergétique : générés à partir du modèle avec des paramétrages, hypothèses ou objectifs spécifiques
- Solveur : algorithme sous forme logicielle pour la résolution d'un problème.
- Synchronisation cognitive : Ensemble des processus cognitifs qui concourent à faire converger les concepteurs vers une solution acceptée par tous, à partir de connaissances du domaine (les contraintes, critères, solutions connues, procédures, ...) et de connaissances sur la résolution du problème (buts, stratégies, heuristiques, ...) [4]
- Reproductibilité : l'obtention de résultats cohérents en utilisant les mêmes données d'entrée, les mêmes étapes, méthodes et codes de calcul, et les mêmes conditions d'analyse (section II.4.1)

Les numéros entre crochet sont liés aux références de la Bibliographie (e.g. [2])

Les lettres entre crochet sont liées aux Matériels supplémentaires (e.g. [B]).

NB : pour disposer d'un écrit plus synthétique, la forme masculine sera parfois employée seule pour désigner des personnes (e.g. *les chercheurs* au lieu de *les chercheurs et chercheuses*), mais ne doit en aucun cas masquer le fait que ces termes incluent toutes les identités de genre.

Matériels supplémentaires

NB: des *tags* et dépôts Software Heritage ont été créés au moment du dépôt du manuscrit, afin de pouvoir se replacer dans les versions originelles des notebooks ci-après :

- Pour OMEGAAlpes_exemples
 - o https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_exemples/-/tags/Sacha_Hodencq_PhD_pre_review ;
 - o <https://archive.softwareheritage.org/swh:1.dir:b63c1037b091a8e0224f26501534e8ddad62f0ef>
- Pour NoLOAD_Benchmarks_open :
 - o https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/design_optimization/noload_benchmarks_open/-/tags/Sacha_Hodencq_PhD
 - o <https://archive.softwareheritage.org/swh:1.dir:5f0b3b621176f0f456ce22aa12ec754e8fded525>

[A] Lien vers le répertoire Gitlab du projet OMEGAAlpes, comprenant notamment le code *omegalpes*, et les exemple et notebooks *omegalpes_exemples* : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes>

[B] Lien vers l'archive Software Heritage de OMEGAAlpes : <https://archive.softwareheritage.org/swh:1.dir:30859bbe9b44134ce846e48ae5595880e211f50d;origin=https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes;visit=swh:1.snp:7c7f0454d5ec673b78cabaf27d28943cdf27dac2;anchor=swh:1.rev:555bbba44755072864a683f109b87ff60c009384>

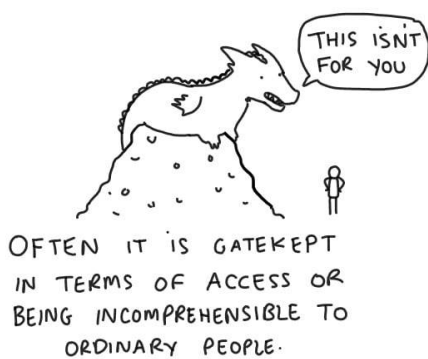
[C] Lien vers le répertoire Gitlab du Notebook ORUCE : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_exemples/-/blob/Sacha_Hodencq_PhD_pre_review/notebooks/PhD_2022_Sacha_Hodencq/ORUCE_autoconso_PV.ipynb

[D] Lien vers le notebook recherche LNCMI : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_exemples/-/blob/Sacha_Hodencq_PhD_pre_review/notebooks/PhD_2022_Sacha_Hodencq/LNCMI_planning.ipynb

[E] Lien vers le notebook médiation LNCMI : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_exemples/-/blob/Sacha_Hodencq_PhD_pre_review/notebooks/LNCMI.ipynb

[F] Lien vers le notebook autoconsommation PV : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/design_optimization/noload_benchmarks_open/-/blob/Sacha_Hodencq_PhD/examples/pv_battery_coverage_gwp/pv_battery_coverage_gwp.ipynb

- [G] Lien vers les supports de cours pour les étudiants de l'ENSAG : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/design_optimization/noload_benchmarks_open/-/blob/Sacha_Hodencq_PhD/lessons
- [H] Lien vers le répertoire notebook présenté aux étudiants de l'ENSAG : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/design_optimization/noload_benchmarks_open/-/blob/Sacha_Hodencq_PhD/examples/pv_battery_coverage_gwp/dimensionnement_PV_ENSAG.ipynb
- [I] Lien vers le notebook ONIRI 2070 pour la compagnie Organic Orchestra : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/blob/Sacha_Hodencq_PhD_pre_review/notebooks/oniri_exp_fr.ipynb



WHAT MIGHT HELP?

- BETTER SCIENCE COMMUNICATION.
- STOP CALLING PEOPLE "IDIOTS" FOR NOT UNDERSTANDING A CONCEPT
- ACKNOWLEDGE THAT PEOPLE REACT TO INFORMATION EMOTIONALLY AS WELL AS INTELLECTUALLY.
- STOP GATEKEEPING. SCIENCE IS FOR EVERYONE. @twisteddoodles

Crédit : twisteddoodles, tous droits réservés.

Introduction générale

« Il faut qu'on soit capable d'ouvrir des carrés de ciel bleu » Alain Damasio [5]

La consommation d'énergie liée aux activités humaines a des impacts importants, qu'ils soient environnementaux avec le dépassement récent de plusieurs limites planétaires [6], ou sociaux avec des questions d'équité dans l'accès à l'énergie. Dans ce contexte, la recherche en génie électrique se positionne pour identifier des leviers d'action et concevoir des systèmes techniques pérennes, en mobilisant aussi bien le vecteur d'énergie électrique que les autres formes d'énergie (chaleur, gaz, ...) pour bénéficier de synergies entre vecteurs. La modélisation énergétique est un outil au service de ces ambitions, puisqu'elle permet d'étudier les objets énergétiques au moyen d'outils informatiques, pour en orienter la conception, l'opération ou la planification.

Dans le même temps, un mouvement émerge dans le monde académique : la Science Ouverte. Cette dynamique vise à rendre la recherche, les données et la diffusion scientifiques accessibles à tous les niveaux d'une société qui s'interroge. Elle consiste en un ensemble de pratique pour que les contenus de la recherche puissent être librement utilisés, modifiés et diffusés. Aussi, à l'intersection de modélisation énergétique et Science Ouverte, on retrouve la modélisation énergétique ouverte, soit la mise à disposition de données et modèles énergétiques et résultats de manière transparente et accessible. Si la modélisation énergétique ouverte comporte de nombreux intérêts, les principales approches historiques et actuelles manquent de transparence. Plusieurs questions émergent alors :

- **Pourquoi** développer la modélisation énergétique ouverte ? Et pourquoi n'est-elle pas la norme ?
- **Comment** développer des méthodes et outils pour atteindre des objectifs de transparence, de collaboration et de reproductibilité dans le monde académique ? Et ce en impliquant différentes sphères de la société...
 - La recherche,
 - les autorités publiques et entreprises, et
 - les collectifs citoyens.
- Comment **valider** la pertinence de ces nouvelles pratiques ?

La question « *Pourquoi développer la modélisation énergétique ouverte ?* » sera traitée dans le **Chapitre I**, qui introduit à la fois les enjeux socio-écologiques liés à l'énergie, et des définitions et éléments de contexte quant aux composantes de la science ouverte. Les avantages et limites de la modélisation énergétique ouverte y sont explorés, ainsi que la notion même de connaissance dans la discipline.

Les questions « *Comment développer ces pratiques ?* » et autour de la *validation* guideront les chapitres suivants. D'abord en présentant les pratiques de modélisation énergétique ouverte

existantes dans le **Chapitre II**, puis avec deux contributions de ces travaux de thèse : la méthode ORUCE et la plateforme COFFEE.

ORUCE (Open and Reproducible Use Case for Energy) est présentée dans le **Chapitre III**. C'est une méthode qui vise à rendre les principes et avantages de la modélisation énergétique ouverte appropriables en mettant à disposition l'ensemble du processus de modélisation énergétique. La méthode mobilise notamment les cas d'étude, vus comme de bons vecteurs de reproductibilité. Des cas d'étude de recherche et de médiation sur des thématiques de la transition énergétique ont été traités dans le **Chapitre IV**, et permettent d'illustrer le processus de modélisation énergétique ouvert et la méthode ORUCE.

Enfin le **Chapitre V** introduit COFFEE, un concept de plateforme de modélisation énergétique ouverte et collaborative à destination de la recherche, des autorités publiques et des collectifs citoyens. Des sections spécifiques sont dédiées à la validation, pour ORUCE (sur des critères de transparence, reproductibilité et accessibilité) comme pour COFFEE (via une enquête centrée sur l'expérience utilisateur).

Le manuscrit de thèse s'articule donc entre une réflexion de fond autour des espaces de science ouverte pour la mise à disposition des processus de modélisation énergétique, et la proposition de méthode et outils à destination de la recherche, mais aussi d'autorités publiques, bureaux d'étude et collectifs citoyens concernés et engagés dans la transition énergétique. Ces réflexions vont de pairs avec des travaux et expérimentations sur des cas d'étude :

- Le projet de valorisation de chaleur fatale du Laboratoire de Champs Magnétique Intense (LNCMI), un projet multi-acteur et multi-énergie où des données et outils ouverts sont mobilisés auprès des acteurs.
- Les communautés énergétiques et l'autoconsommation, emblématiques de la transition énergétique à l'échelle des bâtiments et quartiers dans le domaine du génie électrique.
- Les Low-Ttech, un courant de pensée mobilisant aussi bien les collectifs citoyens que, plus récemment, l'enseignement supérieur et la recherche.

Chapitre I

Ouverture des connaissances dans le milieu de l'énergie : définitions et enjeux

« Ayant l'intelligence, nous ne devons pas agir avec ignorance. Ayant le choix, nous ne devons pas agir sans responsabilité. » L'Ultime Rivage - Ursula Le Guin

SOMMAIRE

Chapitre I	Ouverture des connaissances dans le milieu de l'énergie : définitions et enjeux	14
	Résumé du chapitre.....	15
I.1.	Modélisation énergétique face aux enjeux socio-écologiques.....	16
I.1.1.	La place de l'énergie dans la crise socio-écologique.....	16
I.1.2.	De nouveaux enjeux pour la conception des systèmes électriques et énergétiques	18
I.1.3.	La modélisation énergétique : définition et réponse aux enjeux	20
I.2.	De la science ouverte à la modélisation énergétique ouverte	21
I.2.1.	Contexte de l'ouverture des connaissances dans la recherche.....	21
I.2.2.	Définition et pratiques de la Science Ouverte	22
I.2.2.1.	Science Ouverte : définition(s).....	22
I.2.2.2.	Composantes de la science ouverte	24
I.2.3.	La Science Ouverte réclamée par les institutions.....	25
I.2.4.	Une modélisation énergétique ouverte ?	26
I.2.5.	Intérêts et freins de la modélisation énergétique ouverte.....	29
I.3.	Spécificités de l'ouverture des connaissances dans le domaine de l'énergie.....	31
I.3.1.	Enjeux éthiques et historiques de l'ouverture des connaissances dans le milieu de l'énergie	31
I.3.1.1.	Pour une recherche transdisciplinaire, intègre et éthique sur l'énergie.	31
I.3.1.2.	Historique des pratiques de modélisation énergétique	32
I.3.2.	Approches épistémologiques dans le milieu de l'énergie & conséquences sur les objectifs et limites de la modélisation énergétique ouverte.....	35
I.3.3.	Les Low-Tech, incarnations alternatives d'ouverture dans le domaine de l'énergie	37

I.3.3.1.	Historique des approches techniques alternatives	37
I.3.3.2.	Low-Tech : définition(s) et concepts proches	38
I.3.3.3.	Low-Tech Recherche et Enseignement (LowTRE).....	39
I.3.3.4.	Les Low-Tech comme vecteurs d'ouverture et de collaboration face aux enjeux socio-écologiques.....	40
I.4.	Bilan.....	42

Résumé du chapitre

Ce chapitre s'articule autour de trois points clefs. D'abord la place que l'énergie occupe dans les enjeux socio-écologiques, et la modélisation énergétique comme outil pour faire face à ces enjeux. Ensuite, la science ouverte, comme un paradigme de recherche réclamé et nécessaire, en particulier dans le domaine de l'énergie pour aboutir aux pratiques et avantages de la modélisation énergétique ouverte. Enfin, les spécificités de l'objet énergie en terme d'ouverture de connaissances, notamment avec des approches épistémologiques pour qualifier les connaissances au sein de ce domaine.

I.1. Modélisation énergétique face aux enjeux socio-écologiques

I.1.1. La place de l'énergie dans la crise socio-écologique

Il serait difficile de commencer un manuscrit de thèse sur la thématique énergie sans évoquer la crise socio-écologique en cours. Un des indicateurs les plus mobilisés aujourd'hui est sans doute celui des émissions de gaz à effet de serre (GES). En 2016, les émissions de GES du secteur de l'énergie représentaient presque trois quarts des émissions issues de l'activité humaine, soit environ 36 milliards de tonnes d'équivalent CO₂ (Figure I.1) [7]. Or, si le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a bien confirmé que le changement climatique d'origine anthropique a des conséquences irréversibles, d'autres peuvent encore être limitées via des actions fortes, rapides et durables de réduction des émissions de GES [8].

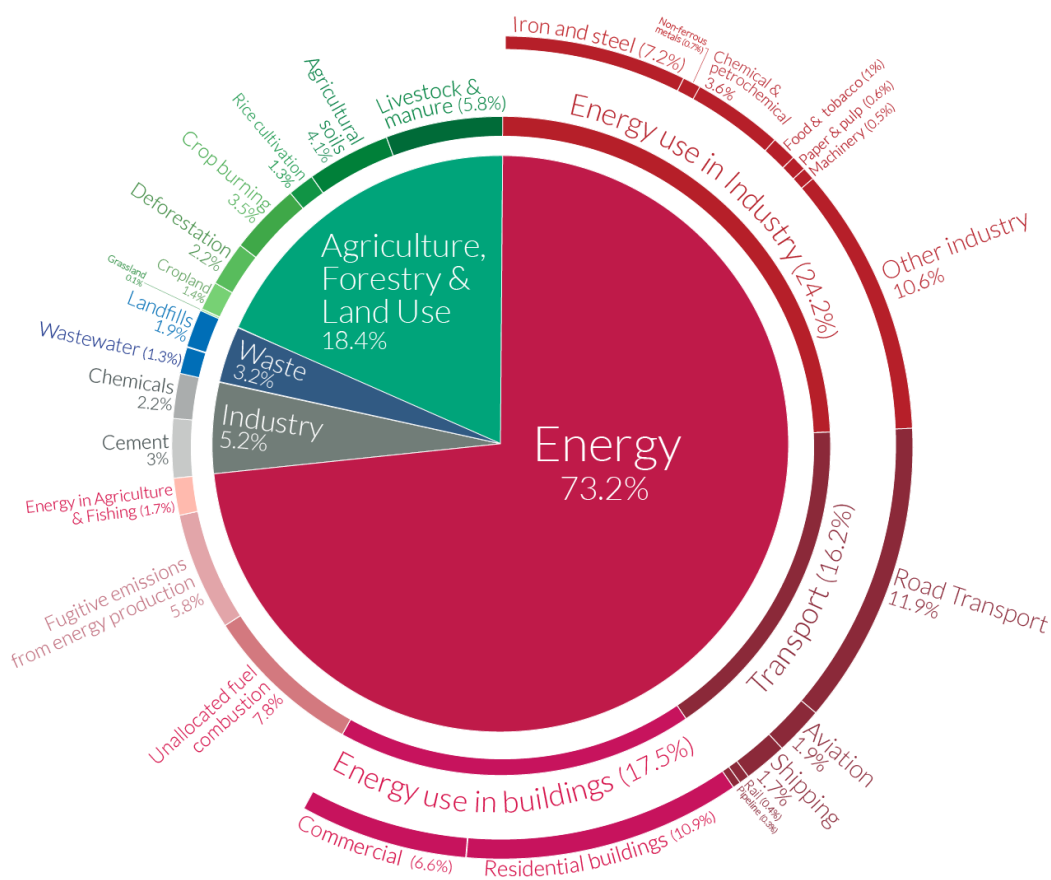


Figure I.1 : Émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteurs en 2016.
Source image : OurWorldInData.org, Hannah Ritchie, 2020, CC-BY. Source données : [7]

Le dérèglement climatique n'est toutefois qu'une facette de la crise en cours. D'abord car il s'inscrit comme une des neuf **limites planétaires**, dont 5 autres ont été dépassées. Les limites (ou frontières) planétaires ont été conceptualisées en 2009 par une équipe de recherche internationale [6], et ont régulièrement été mises à jour depuis. Elles correspondent à des seuils que l'humanité ne doit pas dépasser pour ne pas compromettre les conditions favorables dans lesquelles elle a pu se développer et pour pouvoir durablement vivre dans un écosystème sûr, c'est-à-dire en évitant les modifications brutales et difficilement prévisibles de l'environnement planétaire. Ces neuf processus sont retenus, car ils permettent et régulent

ensemble la stabilité de la biosphère (les limites considérées comme dépassées sont affichées *rouge italique*) [9–11]:

1. *le changement climatique,*
2. *l'érosion de la biodiversité,*
3. *la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore,*
4. les *modifications de l'usage des sols,*
5. l'acidification des océans,
6. *l'utilisation d'eau douce,*
7. l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique
8. l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère,
9. et *l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère.*

Si ce concept de limites planétaires fait face à des critiques, notamment dans ses applications politiques concrètes et sur des questions d'équité entre Nord et Sud, il permet de prendre conscience d'un ensemble d'enjeux systémiques quant à la crise écologique, et remet en cause le dogme de la croissance [12]. Les **enjeux sociaux** en restent toutefois exclus, alors que ceux-ci sont de plus en plus prégnants, notamment suite à la pandémie du Covid-19 : les écarts de richesse se creusent avec une intensification de la pauvreté et la parité homme-femme s'affaiblit [13].



Figure 1.2 : Modèle économique du Doughnut de Raworth. Source : [14] Licence Ouverte v2.0

En 2012, l'économiste Kate Raworth complète les limites planétaires en leur ajoutant un « plancher social » [15] : 11 frontières intérieures correspondant aux besoins humains

essentiels (Figure I.2). Les limites planétaires et le plancher social forment alors un anneau au sein duquel les besoins de chacun.e sont satisfaits tout en préservant le monde vivant dont l'humanité dépend. Ce modèle économique, le « Doughnut », a notamment été utilisé en France pour étudier les interactions entre état de l'environnement et besoins humains [14]. Le plancher social se rapproche d'un autre outil socio-politique, les 17 objectifs de développement durable (ODD) de l'Organisation des Nations Unies (ONU) ayant pour ambition d'éradiquer la pauvreté et les inégalités en assurant la transition écologique et solidaire à l'horizon 2030 [16].

Le **lien entre les activités énergétiques humaines** et le franchissement des limites planétaires n'est plus à démontrer. Bien sûr du fait des émissions de GES comme nous l'avons vu en début de section, mais Algunaibet et al. soulignent également que le mxi électrique participe au dépassement d'au moins 5 limites planétaires aux Etats-Unis, y compris dans un scénario de respect de l'Accord de Paris sur le climat [17].

Sur les aspects sociaux, la comparaison entre les indicateurs énergétiques et de qualité de vie montre qu'il existe **un lien très fort entre énergie et développement**. Kathleen Mallard [18] souligne au début de sa thèse que la qualité de vie augmente avec l'accès à l'énergie, mais de manière non-linéaire, en particulier pour l'énergie électrique : sur les premiers kWh accessibles de manière efficace et équitable au sein d'une population, la qualité de vie mesurée au moyen de l'Indice de Développement Humain (IDH) augmente, avant d'atteindre une asymptote. Au-delà d'un certain seuil, une augmentation de l'accès à l'énergie ne fait plus augmenter la qualité de vie. Le chapitre 5 du rapport spécial 15 du GIEC [19] est également particulièrement éclairant sur les corrélations entre actions de lutte contre le dérèglement climatique dans le secteur de l'énergie, et alignement avec les ODD. Des synergies existent entre d'une part les actions de limitation et d'adaptation au changement climatique et d'autre part les ODD, si et seulement si le bien-être et l'équité sont au cœur des objectifs, sans quoi les inégalités et la pauvreté s'accroissent. On observe en particulier dans la *figure 5.2* de ce rapport (disponible en Annexe 1), la comparaison entre ODD et 3 catégories d'actions : sur la demande énergétique, sur l'approvisionnement énergétique, et sur les terres et océans. La figure souligne de nombreuses **synergies positives avec les ODD** pour les options agissant sur la demande énergétique, plutôt que sur le seul approvisionnement énergétique pour lequel des interactions négatives sont plus présentes.

Le futur de l'énergie n'inclue sans doute pas de solution unique et miraculeuse, mais nécessite plutôt de faire le point sur les ressources à notre disposition localement, et notre manière de les gérer de manière durable. Par durable j'entends : perdurer sans épuisement des ressources matérielles et énergétiques, et dans le respect du vivant actuel et futur. De nouveaux enjeux se présentent alors dans le domaine de l'énergie, notamment pour le génie électrique.

I.1.2. De nouveaux enjeux pour la conception des systèmes électriques et énergétiques

La discipline du génie électrique est active sur les questions de soutenabilité, notamment avec l'intégration de sources d'énergie renouvelables (EnR) [20], mais celles-ci amènent de nouveaux défis et pistes de solutions (Figure I.3) :

- **L'intermittence** : les EnR telles que le solaire, l'éolien ou encore les énergies marémotrices sont directement liées à des ressources naturelles variables, parfois difficilement prédictibles (pour l'éolien notamment), et pas toujours concomitantes avec les usages. Des stratégies de gestion de la demande avec de la flexibilité, de synergies entre les différents vecteurs énergétiques, et de stockage de l'énergie sont autant de leviers pour gérer cette intermittence [21].
- La **décentralisation** : les EnR sont dépendantes de gisement distribués sur les territoires, et leur exploitation entraîne un changement de paradigme dans les réseaux électriques s'éloignant du modèle centralisé historique, désinvisibilisant les usages et expériences de l'énergie [22]. Des réseaux électriques bien conçus et opérés sont alors nécessaires pour intégrer ces ressources décentralisées, en plus de nouveaux modes d'organisation socio-politique.
- Les **nouveaux acteurs** : de nouveaux acteurs apparaissent entre la production et la consommation de l'énergie, tels que les *prosumers* à la fois consommateurs et producteurs, les agrégateurs qui sont des tiers permettant le concept de centrale virtuelle, les communautés énergétiques ou encore les autorités locales, et ceux-ci doivent être intégrés dans la conception et l'opération des systèmes [23].

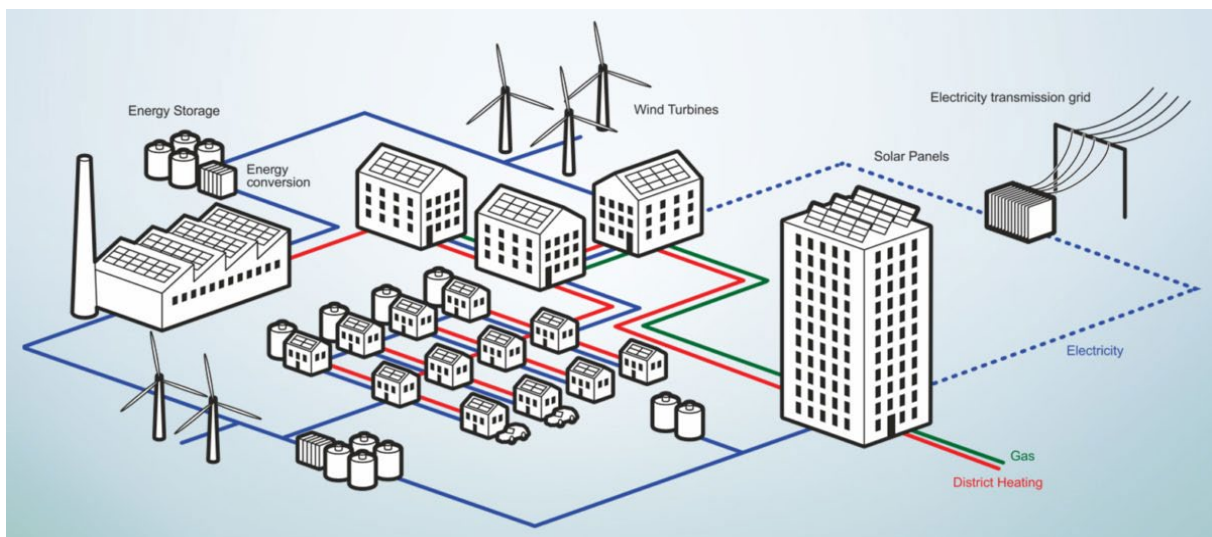


Figure I.3 : Illustration d'un système énergétique multi-vecteur et décentralisé. Source : Sandro Bösch, ETH Zürich, tous droits réservés.

Ces enjeux sont **multi-échelles**, depuis les composants permettant la production, consommation, stockage ou conversion d'énergie jusqu'aux échelles continentales pour la gestion du réseau électrique, en passant par les échelles intermédiaires du bâtiment, du quartier ou des villes. Les villes sont des éléments clés puisqu'elles concentrent environ 64% de la consommation d'énergie primaire [24]. De plus, il est bon de noter que les **questions de recherche** seront **différentes entre les pays développés** où il s'agira de transformer les infrastructures existantes au vue des enjeux socio-écologiques, **et les pays en voie de développement** où il s'agira en grande partie de construire des infrastructures pour rendre l'accès à l'énergie abordable, fiable et soutenable avec des contraintes économiques importantes [20,25,26].

La plupart des approches actuelles se concentrent toutefois sur la production et la gestion du réseau électrique, là où, comme on l'a vu en fin de section précédente, les actions sur la demande énergétique ont été identifiées comme plus alignées avec les ODD. Ces actions sur la demande peuvent permettre plus de flexibilité en reportant ou effaçant des consommations d'énergie, et elles peuvent également permettre de mobiliser un levier souvent ignoré : celui de la sobriété énergétique (ou *energy sufficiency* en anglais) [27]. Il s'inscrit en effet comme un des trois leviers de soutenabilité de notre consommation énergétique : le **développement d'EnR** en remplacement de sources carbonées, l'**efficacité énergétique** (i.e. utiliser moins d'énergie pour fournir un même service), et donc, la **sobriété énergétique**. La définition de la sobriété énergétique est plurielle [28], nous adoptons ici la suivante : « les actions qui réduisent la demande d'énergie [...], tout en modifiant la quantité ou la qualité des services énergétiques demandés de manière durable sans descendre en dessous des besoins fondamentaux des personnes » [29] (la notion de sobriété énergétique sera développée dans la section IV.3.1.4). Cette définition fait notamment écho au seuil d'accès à l'énergie à partir duquel l'IDH stagne, seuil largement franchi par la plupart des pays développés, comme le soulignait déjà Ivan Illich dans *Énergie et Équité* en 1973 [30].

Le recours à la sobriété, de même que le développement de systèmes énergétiques efficace, recourant aux EnR et visant des objectifs sociaux et écologiques rend complexe la conception et l'opération de ces systèmes par rapport aux systèmes historiques, notamment puisqu'intégrant différentes disciplines et types d'acteurs. Face à cette nouvelle complexité, des aspects non-techniques doivent être abordés tels que les comportements des acteurs, les organisations socio-politiques ou encore l'histoire des territoires [31]. Mais le traitement de cette complexité passe aussi par des aspects techniques concernant notamment le dimensionnement et la gestion énergétique, ou encore les calculs d'impacts environnementaux. La modélisation énergétique apparaît alors comme un outil de choix pour concevoir des systèmes énergétiques équitables et soutenables.

I.1.3. La modélisation énergétique : définition et réponse aux enjeux

La **modélisation énergétique** consiste à construire une représentation formalisée d'un objet énergétique aux frontières et composants définis pour l'étudier selon un objectif et dans un contexte donné, grâce à une formulation mathématique traitée par des outils informatiques [23,32–34].

Le modèle est une représentation simplifiée d'un objet complexe, se concentrant sur des aspects importants dépendants de l'objectif de modélisation. Plusieurs modèles peuvent ainsi étudier un même objet selon différentes considérations techniques ou méthodologiques (e.g. impacts environnementaux, pertes thermiques, bilan économique, ...) [23,34,35]. C'est un vecteur d'apprentissage à propos du système réel, et donc un outil de choix pour permettre aux analystes (i.e. des acteurs intermédiaires porteurs de connaissances et compétences techniques) d'explorer différents scénarios énergétiques, éclairant ainsi la réflexion et l'action des acteurs socio-économiques, politiques et issus de la société civile [32,36,37].

La modélisation énergétique est un domaine **interdisciplinaire** où l'informatique rencontre des disciplines relatives à l'énergie comme le génie électrique, thermique, mécanique ou civil,

et les sciences environnementales, économiques et sociales [23,38,39]. Elle peut avoir différents applicatifs :

- depuis la conception de composants énergétiques comme des modules d'électronique de puissance [40], des systèmes de production et machines électriques [41,42],
- jusqu'à la modélisation de scénarios multi-énergie pour du pilotage, ou afin d'explorer le futur en évaluant l'impact de décisions actuelles (planification) [43], à l'échelle de régions, pays et continents [44], en passant par des échelles intermédiaires comme celles du bâtiment [45] ou de la ville [38]. On pourra parler de modélisation de système énergétique ou *energy system modelling*.

Dans la littérature, le terme *energy modelling* peut désigner l'une ou l'autre de ces catégories, et dans cette thèse, nous employons « modélisation énergétique » pour désigner les deux indifféremment. Les applicatifs seront toutefois focalisés sur l'échelle urbaine. En outre, on s'intéressera ici à la modélisation énergétique et non la seule modélisation de systèmes ou composants électriques, afin de considérer les synergies entre vecteurs énergétiques et sélectionner les vecteurs les plus pertinents face à des usages donnés.

La modélisation énergétique peut donc être mobilisée pour répondre aux enjeux socio-écologiques pour la conception et le pilotage de systèmes énergétiques à différentes échelles, et dans différents contextes. Il faut toutefois admettre que les solutions dégagées jusqu'à présent semblent insuffisantes pour répondre aux enjeux, puisque la dynamique de dépassement des limites planétaires et d'accroissement des inégalités ne semble pas ralentir, bien au contraire. Si la recherche et l'innovation peuvent fournir des solutions ingénieuses, elles sont aussi à l'origine des dérives de surexploitation que l'on connaît ces dernières années. Il apparaît donc nécessaire de mener des travaux supplémentaires en la matière, en considérant ces différents enjeux de fond, et en faisant un inventaire de l'existant pour construire des solutions soutenables, et déconstruire ce qui ne l'est pas. Mais également d'adopter une **position réflexive** et interdisciplinaire dans la pratique de la modélisation énergétique pour sortir de la « *Research as Usual* » ; et en questionner les résultats de manière collaborative : comment en est-on arrivé là, et pourquoi aucune inflexion n'est apparue [46,47] ?

I.2. De la science ouverte à la modélisation énergétique ouverte

I.2.1. Contexte de l'ouverture des connaissances dans la recherche

Les défis écologiques et sociaux demandent de mobiliser la recherche scientifique au service du bien commun [48,49], mais cela entraîne différentes problématiques [50].

- *Dans les institutions*, les financements compétitifs, même s'ils restent minoritaires en France, donnent à la recherche le rôle de prouver son intérêt socio-économique, ce qui peut entraîner :
 - Une forme d'individualisation de la recherche dans les laboratoires, où les thématiques des personnels s'orientent en fonction des appels d'offre,

- Une tendance au statu-quo, car il est souvent plus aisé de s'appuyer sur des résultats précédents sans prise de risque, et à un « court-termisme » dû à l'attente de résultats,
- Une inflation des tâches administratives et une division du travail.
- *Dans les valeurs*, avec des tensions et injonctions contradictoires [51,52] entre :
 - Contribution aux avancées scientifiques et l'exploitation par des pouvoirs privés,
 - Valorisation universitaire sous forme de publications qui devient de plus en plus intense (*publish or perish* [53]), et valorisation industrielle (e.g. brevets) pour commercialiser un concept dans un contexte concurrentiel,
 - Science ouverte et science fermée, avec un accès à la connaissance limité, notamment dans le domaine de l'énergie (sera développé dans la section I.2.4).

Aussi, la position réflexive de la recherche s'incarne notamment dans un mouvement émergent d'ouverture des contenus de recherche qui arrive comme un élément de réponse à ces problématiques : la Science Ouverte [54]. Dans cette section, nous nous attachons à présenter ce mouvement de manière générale, avant de retrouver le sujet de l'énergie en considérant l'ouverture des connaissances dans ce domaine, et finissons par introduire des pratiques à l'intersection entre modélisation énergétique et science ouverte : la modélisation énergétique ouverte.

I.2.2. Définition et pratiques de la Science Ouverte

I.2.2.1. *Science Ouverte : définition(s)*

La Science Ouverte peut être définie à la fois comme [55] :

- ➔ Un **mouvement** visant à rendre la recherche, les données et la diffusion scientifiques accessibles à tous les niveaux d'une société qui s'interroge. A ce titre, les récentes recommandations de l'UNESCO constituent une référence [48] :

« la science ouverte établit un nouveau paradigme qui intègre dans l'entreprise scientifique des pratiques de reproductibilité, de transparence, de partage et de collaboration résultant de l'ouverture accrue des contenus, des outils et des processus scientifiques. » [...]

« la science ouverte s'entend comme un concept inclusif qui englobe différents mouvements et pratiques visant à rendre les connaissances scientifiques multilingues, librement accessibles à tous et réutilisables par tous, à renforcer la collaboration scientifique et le partage des informations au profit de la science et de la société, ainsi qu'à ouvrir les processus de création, d'évaluation et de diffusion des connaissances scientifiques aux acteurs de la société au-delà de la communauté scientifique traditionnelle. »

- ➔ Un **savoir** transparent et accessible, partagé et développé via des réseaux collaboratifs.

La définition du **savoir ouvert** est plurielle, même si la plupart se recoupe [56,57]: un **savoir ouvert** correspond à tout contenu, information ou donnée qui peut être **librement utilisé, modifié et diffusé, sans aucune restriction** légale (voir la section II.2.2.1 sur les licences ouvertes), technologique (e.g. dont l'accès ne nécessite pas de logiciel propriétaire), ou sociale (coût, compréhension). L'Open Content Definition de Wiley [58] propose un moyen mnémotechnique avec les 5R: un contenu ouvert fournit à toutes et tous le droit de : *Retain, Revise, Remixe, Reuse, Redistribute*, i.e. :

Retain
 Reviser
 Remixer
 Reutiliser
 Redistribuer

Figure I.4 : 5R de la définition de contenu ouvert. Source : auteur à partir de Wiley.

- Conserver (contrôler une copie),
- Réviser (éditer, adapter, modifier),
- Remixer (combinaison avec d'autres pour faire quelque chose de nouveau),
- Réutiliser (utiliser publiquement une copie),
- Redistribuer (partager ces copies).

La Science Ouverte comprend en outre 5 écoles de pensée, correspondant à 5 grandes préoccupations non-exclusives [59] :

- **L'école démocratique**, pour rendre le savoir académique accessible gratuitement à tous.
- **L'école pragmatique**, pour exploiter les effets de réseau en reliant les chercheurs et en rendant les méthodes académiques transparentes.
- **L'école infrastructurelle**, pour disposer d'une recherche efficace avec des plateformes, des outils et des services de diffusion et de collaboration facilement disponibles.
- **L'école publique**, pour amener le public à collaborer à la recherche et rendre la production universitaire plus facile à comprendre.
- **L'école des mesures**, pour proposer des « métriques alternatives » mobilisant les nouvelles possibilités offertes par les outils numériques en réseau (e.g. *l'open peer review* [60]), et mesurer l'impact des travaux de recherche.

La Science Ouverte cherche donc à faire progresser un ensemble de principes clefs de la recherche, présentées dans la Figure I.5.

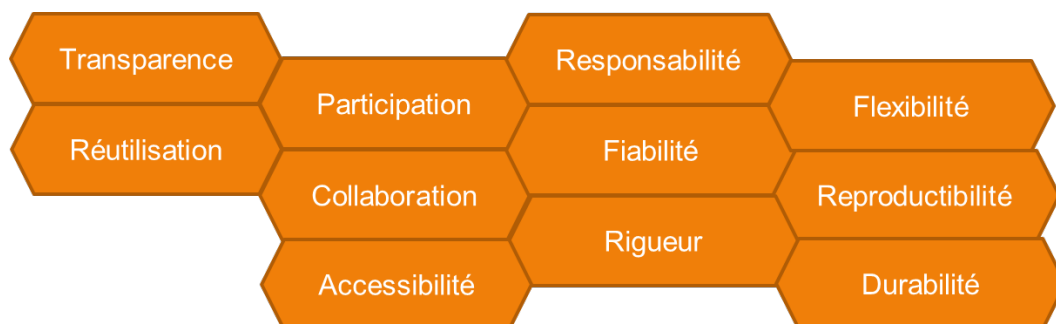


Figure I.5 : Valeurs clefs associées à la Science Ouverte. Source : auteur.

Ainsi, certains acteurs considèrent que la Science Ouverte correspond tout simplement à une **recherche responsable**, qui assume son implication dans un contexte, qui prend acte de son

impact, et qui évalue sérieusement toutes les conséquences de façon multidimensionnelle et interdisciplinaire des connaissances et des techniques produites [50] :

- Responsabilité de la mission d'intégrité qui a été confiée, dans la transparence et la rigueur.
- Responsabilité de la considération, i.e. répondre à un territoire, des citoyens, assurant la pertinence sociale de la science.
- Responsabilité de l'éthique des vertus, en répondant aux enjeux avec modération, mesure, et en prenant en compte de l'ensemble des connaissances à disposition avec pluralisme.

I.2.2.2. Composantes de la science ouverte

Dans la pratique, le mouvement de la science ouverte peut s'articuler autour des types de contenus à ouvrir, que l'on peut retrouver aux différentes étapes de la méthode scientifique (Figure I.6) [48,61] :

- les **données ouvertes** (*open data*) comme données d'entrée ou résultats de l'étude ;
- les **codes sources ouverts** (*open source* ou *free software*, voir l'Annexe 2 pour une distinction entre les deux concepts) pour mener l'étude et analyser les données,
- le partage des résultats sous formes d'articles en libre accès (*open access*), au moins à la lecture, au téléchargement et à l'impression, gratuitement et sans obstacle [62]. Les différents modes de partages sont présentés dans l'Annexe 3.
- En outre, la **recherche participative** (ou *Citizen Science* pour Science Citoyenne/Participative), parfois distinguées de la Science Ouverte, consiste à faire participer des individus ou collectifs non-académiques dans la collecte et/ou l'analyse des données, ou la conception du projet de recherche. Le projet peut être porté aussi bien par une autorité scientifique que par une communauté [63]. Ces pratiques permettent notamment d'inclure la société civile et ses savoirs expérientiels¹ [50] dans le processus de recherche, de rendre les connaissances accessibles et compréhensibles (on parle de justice épistémique), et de répondre à des questions et enjeux qui affectent directement les populations locales. L'*European Citizen Science Association* (ECSA) en donne 10 principes clefs [65] et en souligne les intérêts communs avec la Science Ouverte [66] :

« La Science Citoyenne et la Science Ouverte peuvent ensemble participer à relever de grands défis, répondre à la baisse de confiance de la société en la science, contribuer à la création de biens communs et de ressources partagées, et faciliter le transfert de connaissances entre la science et la société pour stimuler l'innovation. Les questions d'ouverture, d'inclusion et de responsabilisation, d'éducation et de formation, de financement, d'infrastructures et de systèmes de récompense sont abordées en ce qui concerne les défis essentiels des deux approches. »

¹ ou encore savoirs vernaculaires, i.e. des savoirs contextualisés liés à l'expérience ontologique de l'espace et du milieu [64]

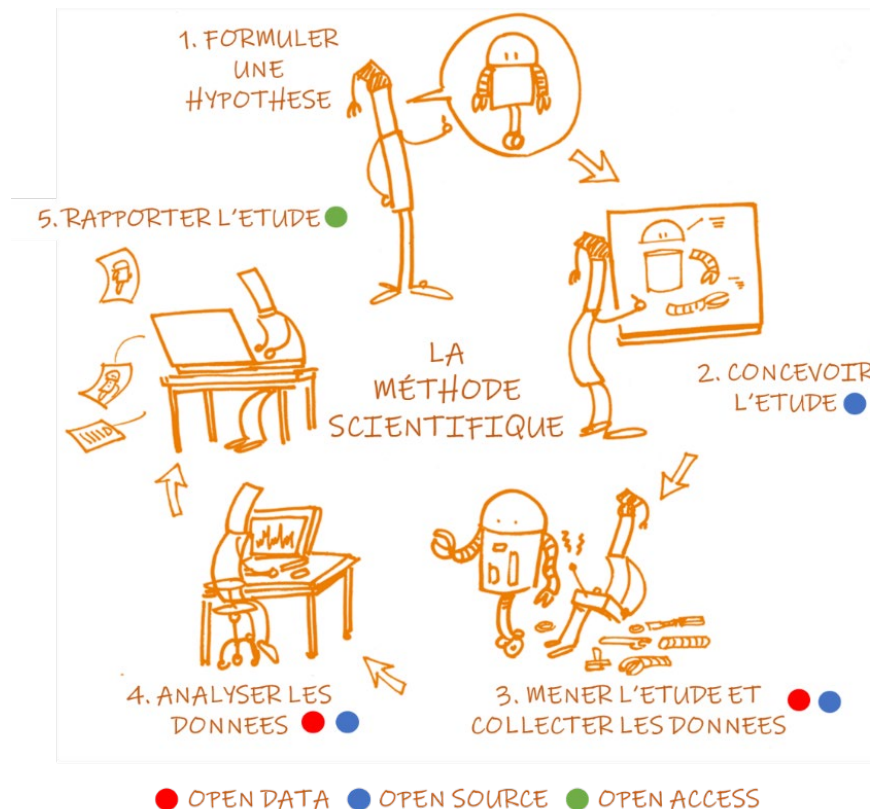


Figure I.6 : Étapes de la méthode scientifique, comprenant les contenus ouverts. Source : auteur à partir de l'Open Science Training Handbook [61].

D'autres pratiques peuvent également être mobilisés : les matériels libres (*open hardware* ou *open source hardware*, ou encore *open design* pour qualifier le partage des plans sous licence libre pour du matériel accessible, co-construit et co-créé [67,68]), ou les ressources éducatives libres (*open teaching materials*).

I.2.3. La Science Ouverte réclamée par les institutions

La Science Ouverte est un sujet en forte évolution ces dernières années, et de plus en plus réclamée par les institutions à différentes échelles (Figure I.7) :

- En France
 - Au sein du CNRS, dans la feuille de route en matière de science ouverte [69], et dans la partie 7.2 des objectifs 2019-2023 [70].
 - La déclaration conjointe du réseau des agences de financement françaises en faveur de la science ouverte , comprenant notamment l'ANR et l'ADEME [71].
 - Les recommandations de l'Académie des Sciences pour une mise en pratique de la science ouverte en janvier 2022 [72].
 - L'État français, d'abord avec la Loi pour une République Numérique en 2016 [73] qui impose notamment un comportement proactif d'ouverture et de diffusion des données et codes [51], puis les deux éditions du Plan National pour la Science Ouverte [74], le rapport de la mission Bothorel *Pour une politique publique de la donnée des algorithmes et des codes sources* [75], et le plan d'action logiciels libres et Communs numériques [76].

- En Europe
 - La création de l'*Open Science Platform* exigeant l'accès ouvert pour les projets H2020 et suivants [77,78].
 - La stratégie relative aux logiciels open-source pour 2020-2023 [79],
 - La déclaration de Bonn sur la liberté de la recherche [80],
 - Le plan S, i.e. la Stratégie de Non-Cession des Droits des articles scientifiques [81] (mis en œuvre en France par l'ANR en 2022).
- Dans le monde
 - L'appel commun pour la science ouverte de l'UNESCO, l'OMS, et le commissaire des nations unies pour les droits humains [82].
 - L'adoption de la recommandation pour la Science Ouverte de l'UNESCO [48].

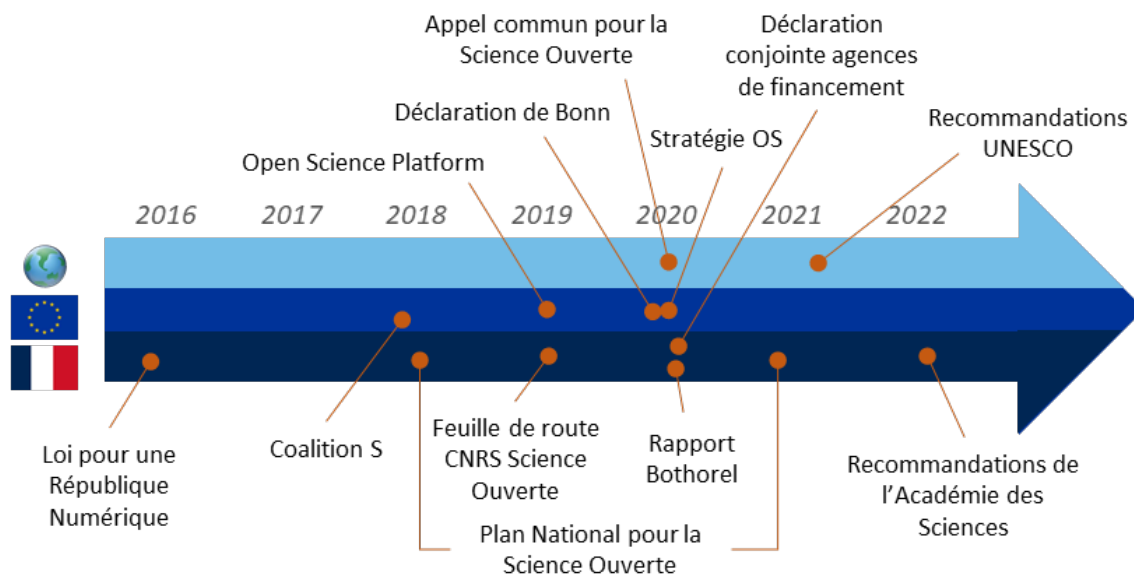


Figure I.7 : Principales actions institutionnelles relatives à la Science Ouverte ces dernières années en France, en Europe et dans le monde. Source : auteur.

Néanmoins, la mise en pratique de ces politiques est encore discrète en France, notamment pour la publication de logiciels open source, et aucune sanction ou recours n'est prévu si les recommandations ne sont pas suivies. En outre, on peut noter un manque de personnels dédiés, et des services de valorisation souvent peu impliqués (voire en opposition) sur les enjeux de Science ouverte [51]. De même, la Free Software Foundation Europe souligne le manque d'application et de mesures concrètes de la stratégie européenne sur l'Open Source [83].

I.2.4. Une modélisation énergétique ouverte ?

On l'a vu dans la première section de ce chapitre, la modélisation énergétique apparaît comme un outil de choix pour répondre aux crises socio-écologiques. Dans un monde aux ressources finies, la mise en commun et l'ouverture des travaux apparaît comme essentielle pour faire face aux enjeux : un partage des données, outils et résultats semble indispensable. A l'intersection de la science ouverte et de la modélisation énergétique, on retrouve la **modélisation énergétique ouverte**, i.e. la mise à disposition de données et modèles

énergétiques et résultats de manière transparente et accessible. Ces pratiques sont à distinguer de la modélisation énergétique transparente (ou publique), une première étape où les données et codes sont accessibles mais sans licence ouverte (voir la section II.2.2.1), ce qui empêche la reproductibilité par manque d'information ou contrainte légale [37,84].

Si la diffusion de connaissances dans les différentes sphères de la société apparaît comme essentielle pour la conception de systèmes soutenables [85], les **principales approches historiques et actuelles** de modélisation énergétique **sont propriétaires et manquent de transparence**, faisant de l'énergie un domaine de recherche en retard sur les questions d'ouverture des connaissances [36]. La Figure I.8 montre que pour les publications seules, le génie électrique fait partie des dernières disciplines en Europe sur la période 2009 – 2018, avec seulement 20% d'ouverture. Le Baromètre Français de la Science Ouverte témoigne toutefois d'une amélioration ces dernières années dans les disciplines d'ingénierie, avec un passage de 27% à 50% d'articles en accès ouverts entre 2018 et 2021 [86]. La modélisation énergétique ouverte a une émergence prometteuse [87] : un nombre grandissant de modélisateurs adoptent des pratiques ouvertes et se rassemblent en communautés telles qu'*openmod* [88,89], dont le wiki identifie une liste de modèles ouverts [90].

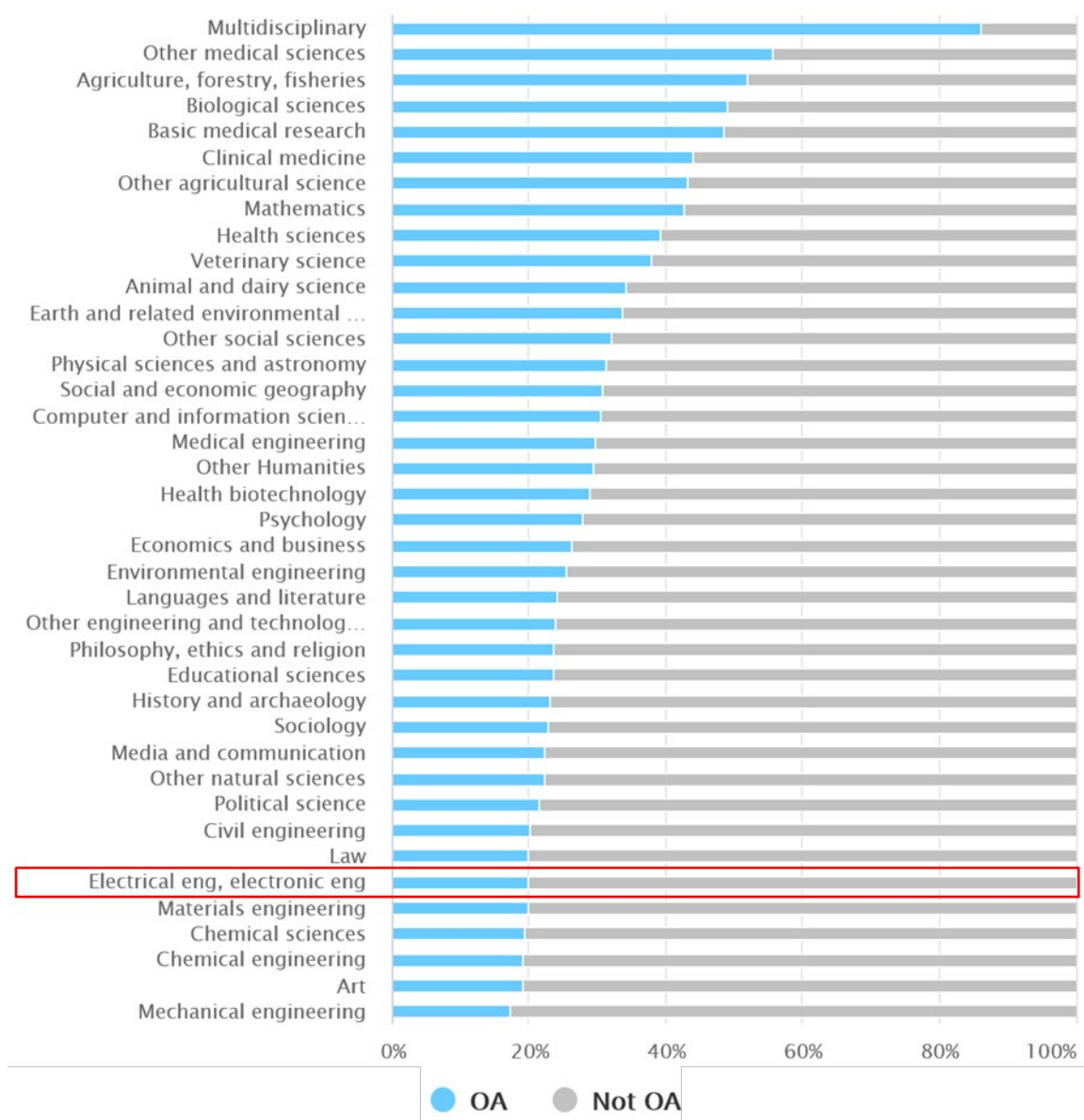


Figure I.8 : Pourcentage de publications en accès ouvert par disciplines en Science et Technologie.
Source : EU Open Science Monitor, 2009-2018 [91].


Le manque d'ouverture pose différents problèmes, avec :


- 🔒 Des **études opaques** [92], non reproductibles [93–96], et comprenant potentiellement des biais (i.e. les modèles conçus pour produire un certain type de résultats) voire des erreurs difficiles à détecter et donc à corriger [36,84,94,97],
- 🗨️ Une **crise de confiance** en la recherche de la part du public et des politiques [36,63,84,98,99],
- 👤 Des **efforts parallèles** [36,95,100] et difficultés de comparaisons entre projets [101,102],
- 👋 Des **barrières d'adoption** [100], en termes de compréhension, mais aussi en termes financiers pour des organismes qui ne peuvent pas accéder à des connaissances et outils commerciaux.


La question de l'ouverture des données de l'International Energy Agency (IEA), présentée en Annexe 4, est assez emblématique des problèmes liés au manque d'ouverture.


I.2.5. Intérêts et freins de la modélisation énergétique ouverte

Au-delà des incitations, et du conditionnement de certains financements par les institutions, la modélisation énergétique ouverte peut s'imposer car elle dispose de nombreux avantages, notamment en réponse aux problèmes liés à la fermeture des connaissances :

 Tout d'abord, les pratiques de modélisation énergétique ouverte permettent de disposer d'une **science de meilleure qualité**. Cela passe par la **transparence** et la **reproductibilité** des études qui permettent de comparer les modèles [101,103,104], et une meilleure **vérification** par les pairs et les tiers [51,93,105], notamment pour détecter des biais [84,94], des erreurs, voire de la fraude [36,43]. L'ouverture offre une **indépendance technologique** par rapport à des solutions propriétaires [106], et la **pérennité** de l'accès aux ressources est améliorée, ce qui assure une certaine résilience et favorise le maintien et l'amélioration continue [100,105]. En outre, cela peut limiter les pertes d'informations lors de changement de personnels sur un projet.

 Ensuite, la transparence apporte de la **fiabilité** aux arguments scientifiques dans le débat public autour de la transition énergétique [36,84]. Des acteurs soulignent notamment que l'argent public devrait financer des contenus accessibles librement [83,87,95], car la recherche du domaine a une forme de **redevabilité** [51] : la modélisation énergétique oriente les politiques en la matière et impacte donc directement la société [36]. Cette accessibilité des études améliore la **participation** aux processus de décision [93,98,107], et facilite l'implication citoyenne [108], ce qui a été identifié comme une clef dans les démarches de transition [21,109].

 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 [110], participant à leur rayonnement [51]. Les **collaborations** entre les partis impliqués sont facilitées [32,43,100], rendant les interactions plus efficaces notamment entre sciences et politiques par le partage des méthodes et du travail quantitatif [36,84]. La **mutualisation** peut en outre permettre de réaliser des économies d'échelle [51,106,111].

 Enfin, l'ouverture offre une **équité dans l'accès à la modélisation énergétique**, pour tous publics et en toute région du monde, sans condition de revenus [54,87,106]. Les contenus sont plus compréhensibles via l'accès aux hypothèses et méthodes de modélisation [94,105]. Les outils sont plus simples à appréhender [43] et interopérables [106], les rendant particulièrement adaptés pour des contenus éducatifs [100]. Leurs fonctionnalités peuvent en outre être plus facilement **adaptées** et étendues à de nouveaux contextes [100,105], ce qui est capital pour le traitement des enjeux socio-écologiques localisés et donc spécifiques.

Ces avantages sont autant de facettes de la modélisation énergétique ouvertes, présentées dans la Figure I.9.

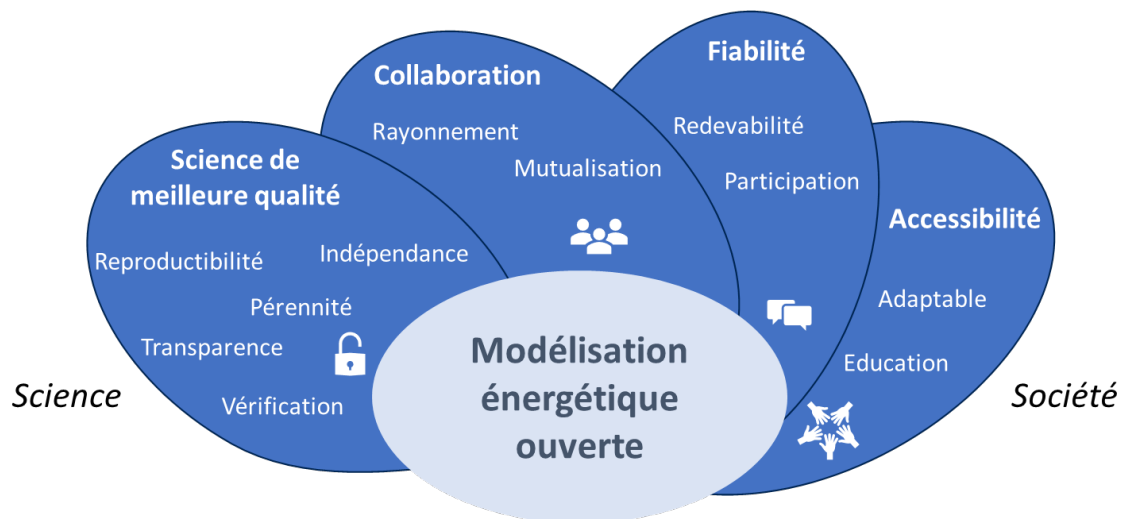


Figure I.9 : Avantages de la modélisation énergétique ouverte, entre Science et Société. Source : auteur.

En plus de ces nombreux avantages, la mise à disposition par défaut des ressources de modélisation énergétique vient questionner celles qui ne le sont pas, et permet d'auto-entretenir cette dynamique. Enfin, envisager l'ouverture de ses productions à des regards extérieurs force à une certaine réflexivité sur ses travaux : un recul critique et une hygiène qui peuvent demander un certain effort mais conduisent également à une amélioration scientifique.

Si la modélisation énergétique ouverte dispose de hauts standards comparables à ceux des pratiques fermées [43,100,111,112], elle doit encore faire face à certains **freins et défis** :

- Tout d'abord un besoin d'**acculturation** à la science ouverte et aux pratiques associées [87,113] (qui seront décrites dans la section II.2.2).
- Également les stratégies d'**enfermement propriétaire** (*lock-in*) de certains modèles, où les utilisateurs restent captifs de l'usage de logiciels propriétaires [87].
- Le manque d'**utilisabilité** de certaines solutions open-source [23,32,114] (e.g. problèmes d'ergonomie).
- La **surcharge d'informations** (*information overload*), i.e. le trop plein d'informations disponibles rendant les contenus peu compréhensibles [32,94]. En outre, la manière dont les contenus sont communiqués est également essentielle, notamment pour l'implication citoyenne [115].
- Enfin dans le milieu académique, un **non-alignement dans les pratiques** : là où l'ouverture nécessite des partages tôt et réguliers, la culture académique tend à ne publier ses résultats qu'une fois les travaux bien finalisés. Cette culture est d'autant plus ancrée en situation de compétition entre équipes de recherche, notamment pour des financements, ou encore par peur d'être jugé sur des travaux préliminaires [51,84].
- Et donc, la nécessité de **changements profonds** dans les politiques et culture scientifiques (e.g. dans les modes d'évaluation des chercheurs), face à une inertie institutionnelle et un manque d'incitations et de moyens [36,51,54,84,87,108,116].

I.3. Spécificités de l'ouverture des connaissances dans le domaine de l'énergie

Dans les sections précédentes, nous avons vu l'importance de la modélisation énergétique et de son ouverture. Avant d'aborder les outils et pratiques de la modélisation énergétique ouverte dans le Chapitre II, cette section souligne les spécificités de l'ouverture des connaissances dans le domaine de l'énergie, notamment de l'objet énergétique lui-même, et l'histoire de son traitement, mais aussi la notion de connaissance de cet objet à travers des approches épistémologiques. Ce « détour » apparaît nécessaire pour pleinement saisir les enjeux et intérêts de ces travaux de thèse.

I.3.1. Enjeux éthiques et historiques de l'ouverture des connaissances dans le milieu de l'énergie

I.3.1.1. *Pour une recherche transdisciplinaire, intègre et éthique sur l'énergie.*

L'énergie est un objet d'étude particulier à plusieurs égards. Tout d'abord, il mobilise plusieurs sphères de la société et mêle différentes conceptions, comme le souligne la socio-anthropologue Laure Dobigny [117] :

- l'abstraction théorique « E » utilisée dans les équations des sciences techniques, une « pure création de l'esprit humain » ; dont découle l'énergie *objectivée* des sciences économiques et politiques ;
- et l'énergie que tout à chacun pratique, utilise au quotidien (e.g. en allumant un ordinateur, une lumière, un chauffage).

« Aussi modifier les choix et usages énergétiques implique de modifier [...] les représentations, valeurs et normes sociales qui les conditionnent. »

De plus, les projets énergétiques correspondent à des systèmes socio-techniques complexes (comprenant des questions éthiques, esthétiques, symboliques, politiques, etc.), et non à de simples problèmes techniques apolitiques qu'il faudrait résoudre [22,92]. Aussi, et nous l'avons déjà évoqué, l'étude de l'énergie se doit d'être interdisciplinaire, voire **transdisciplinaire** pour impliquer des acteurs académiques de différents domaines aussi bien que des acteurs non-académiques et faire avancer des connaissances communes [118]. Ce travail a besoin de se déployer sur le temps long, notamment en raison de l'effort de synchronisation cognitive² nécessaire entre parties prenantes de cultures différentes. Il s'agit notamment de trouver des manières de discuter et d'étudier l'énergie en intégrant ses enjeux techniques, mais sans céder aux injonctions socio-techniques associées [92].

Enfin, et nous l'avons également abordé, l'énergie a des **impacts importants**, qu'ils soient environnementaux, sociaux, ou encore paysagers [119,120], à des échelles très localisées aussi bien que globales. Ces impacts appellent à une **recherche intègre** (qualité et rigueur scientifiques) **et éthique** (démarche réflexive sur la pertinence est les impacts). Michel Serres

² Ensemble des processus cognitifs qui concourent à faire converger les concepteurs vers une solution acceptée par tous, à partir de connaissances du domaine (les contraintes, critères, solutions connues, procédures, ...) et de connaissances sur la résolution du problème (buts, stratégies, heuristiques, ...) [4]

propose même un « serment » généralisé à l'ensemble des sciences³ [121]. L'éthique de la recherche souligne notamment la démocratisation d'une part de la science elle-même avec le pluralisme scientifique et l'abandon de l'idée d'une science neutre, et d'autre part des relations entre science et société avec la co-construction d'orientation de recherche [50]. Pour ce faire on peut distinguer deux approches non-exclusives dans la modélisation énergétique :

- *Society in models* où il s'agira de faire apparaître les enjeux socio-politiques dans les modèles (e.g. les travaux de thèse de Lou Morriet aux laboratoires G2Elab et PACTE [122]),
- *Models in society* où les modèles sont mis à disposition via des pratiques d'ouverture, ce que nous traiterons dans cette thèse.

Ces deux approches peuvent participer à réduire l'asymétrie des savoirs entre parties prenantes [122].

➔ **La modélisation énergétique ouverte peut alors se placer comme un outil de choix pour une recherche transdisciplinaire, intégrée et éthique sur l'énergie, un objet de recherche ontologiquement flou mais aux impacts importants.**

Dans la postface de l'ouvrage *Face à la puissance*, Alain Gras indique que « le problème ne se situe donc pas directement sur le plan technique mais bien en amont, dans un ensemble socio-historique » [31]. Des approches historiques peuvent ainsi éclairer les spécificités présentées dans cette section. Faisant écho à la section ci-dessus, l'Annexe 5 présente l'évolution de la responsabilité de la recherche au cours de l'histoire des sciences. La section suivante se concentre quant à elle sur l'histoire des pratiques de modélisation énergétique.

I.3.1.2. *Historique des pratiques de modélisation énergétique*

Les enjeux environnementaux globaux liés à l'énergie sont relativement récents : la Figure I.10 présente l'évolution de la consommation d'énergie primaire par source à partir de 1800, et on observe que la consommation d'énergies fossiles ne devient significative qu'à la fin du XIX^{ème} siècle.

En France, la consommation d'énergies fossiles ne dépasse celle des énergies renouvelables qu'en 1903, et l'électrification massive date du siècle dernier [31]. La qualification d'énergie « renouvelable » n'est d'ailleurs proposée qu'au XIX^{ème} siècle par William Stanley Jevons, précurseur des approches systémiques, qui souligne que la consommation de ressources épuisables (dans son cas le charbon) en prive les générations futures [123]. Les peurs de pénuries du XX^{ème} siècle conduisent à chercher de nouveaux gisements plutôt que de repenser et réduire la consommation énergétique. La simplicité technique comme la considération du milieu et des usages sont dénigrées [31]. L'évolution des systèmes techniques relatifs à l'énergie n'est alors pas fondée sur des progrès techniques, sur des ressources disponibles ou

³ « Pour ce qui dépend de moi, je jure : de ne point faire servir mes connaissances, mes inventions et les applications que je pourrais tirer de celles-ci à la violence, à la destruction ou à la mort, à la croissance de la misère ou de l'ignorance, à l'asservissement ou à l'inégalité, mais de les dévouer, au contraire, à l'égalité entre les hommes, à leur survie, à leur élévation et à leur liberté. »

même sur des arguments économiques, mais guidée par des questions de pouvoirs politique, militaire et idéologique [124], là où la question écologique doit aujourd’hui s’imposer [123].

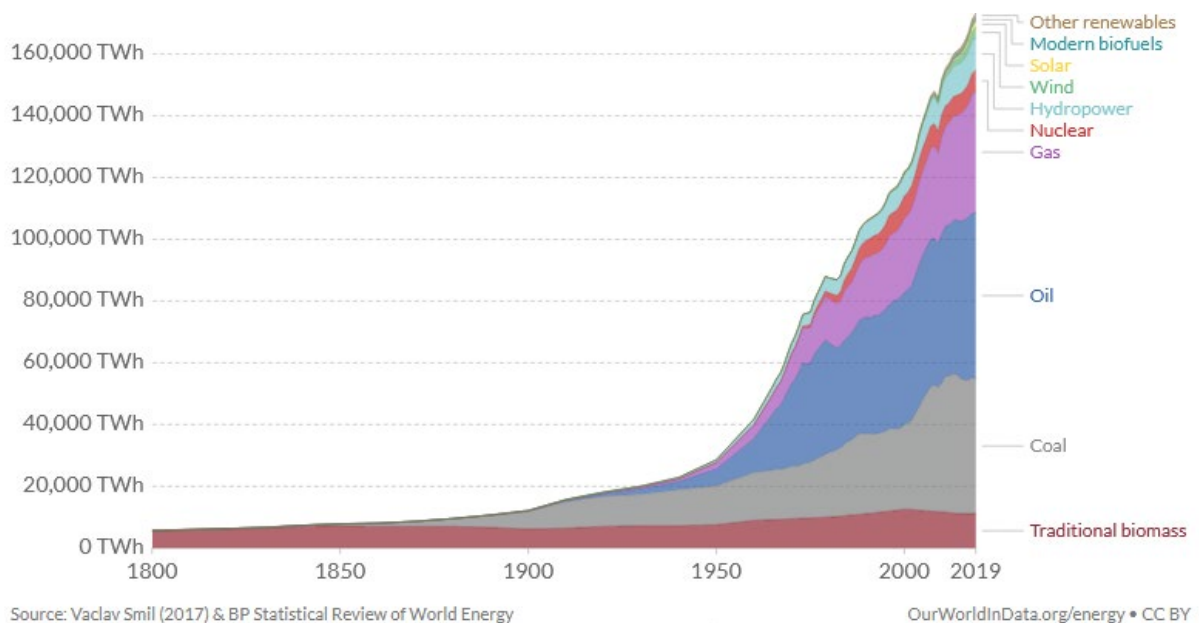


Figure I.10 : Consommation d’énergie primaire par source depuis 1800. Source : OurWorldInData.org, CC-BY

En ce début de XXI^{ème} siècle, on peut néanmoins noter l’apparition de nouveaux acteurs tels que les autorités locales qui gèrent de plus en plus les ressources énergétiques territoriales, ou les citoyens impliqués dans des mouvements de réappropriation de l’énergie [92,125].

Le **regard de la recherche sur l’énergie** évolue lui aussi : les événements historiques du XX^{ème} et l’évolution des sciences économiques amènent les chercheurs à s’éloigner des considérations macroscopiques de Jevons, et à se focaliser sur des considérations spécifiques de l’exploitation du pétrole [123]. La notion de propriété scientifique que l’on peut faire remonter au XIV^{ème} siècle et se développe aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles [126,127], connaît également son apogée dans les années 1930, pour des raisons symboliques, morales et économiques. Elle fait écho au droit du brevet, qui protège les inventions pour promouvoir l’industrie, mais pas les découvertes scientifiques. Le brevet est à la fois vu comme une reconnaissance de l’inventeur (modèle français), et de l’utilité de l’invention (modèle anglo-saxon). C’est également au cours du XX^{ème} siècle que la recherche s’internalise dans les entreprises dans des cellules de Recherche & Développement, avec une accélération depuis le tournant néolibéral des années 1980 où les entreprises augmentent les financements dans la recherche tandis que les financements publics baissent [63]. On constate alors une intensification de l’usage de la propriété intellectuelle, à la fois pour sécuriser les investissements, comme monnaie d’échange et comme métrique dans les bilans d’entreprises [128].

Mais ces dernières années ont également été le théâtre d’un bouleversement de la recherche avec l’arrivée du **numérique** [113], l’informatique n’étant apparue en tant que telle qu’à partir du milieu du XX^{ème} siècle [129]. C’est une opportunité à la fois pour le développement de la modélisation énergétique, mais aussi pour celui de la Science Ouverte via un partage facilité des ressources :

- Les premiers modèles de systèmes énergétiques apparaissent suite à la crise pétrolière de 1973, quand les acteurs industriels et politiques réalisent l'importance de la stabilité énergétique et d'une planification énergétique long terme [112,130]. Les années 1980 et 1990 voient se développer une plus grande diversité de modèles avec de nouvelles préoccupations, notamment environnementales, puis des modèles d'intégration d'énergie renouvelables à partir des années 2000 [102].
- Le mouvement du libre naît dans les années 1980 en réaction à l'appropriations des logiciels (Annexe 2), et la déclaration de Budapest a lieu en 2002, fournissant un cadre théorique à l'open access [62].

Le manque d'ouverture notamment concernant la logique interne et les hypothèses de modélisation énergétique ont été grandement critiqués ces dernières années [105]. La plupart des modèles sont fermés et propriétaires, ce qui devient particulièrement problématique dans un contexte de diversification des acteurs et de complexification due aux nouveaux enjeux dans le domaine de l'énergie [87]. En résulte l'apparition de premiers outils de modélisation énergétique ouverte dans les années 2000 : Balmorel en 2001, deeco en 2004, PSAT en 2005 ou encore OSeMOSYS en 2009 et TEMOA en 2010 [43,87]. La tendance s'accélère dans les années 2010, notamment avec la création de l'Open Energy Modelling Initiative (*openmod*) en 2014 qui promeut la modélisation énergétique ouverte à travers le monde [88,89].

L'écosystème de la modélisation énergétique ouverte n'est en outre pas uniquement concentré dans les sphères académiques : les acteurs privés de l'énergie y sont aussi présents. En France, par exemple avec l'orchestrateur de cosimulation daccosim de EDF [131], le modèle de simulation offre-demande Antares de RTE [132], ou encore Pyleecan développé par l'entreprise Eomys à Lille pour la conception multiphysique de machines électriques [133]. La modélisation énergétique ouverte s'incarne également par des jeux de données ouverts et des applications à destination des citoyens, avec par exemple le service Datagir de l'ADEME [134]. Les pratiques de modélisation énergétique ouverte peuvent permettre à ces acteurs de faire le lien avec les nouvelles parties prenantes des systèmes énergétiques, avec des contenus adaptables. Elles ont d'autres avantages telles que l'accélération des cycles de développement et des délais de commercialisation, l'amélioration de l'interopérabilité et la réduction des coûts [135], ou encore le développement d'une image favorable pour l'entreprise [136]. L'open-source permet en outre de repenser les relations privé/public en prenant en compte les priorités des différents acteurs, via des règles de gouvernances et un cadre contractuel de coopération pour la réussite d'un projet [51].

➔ **La modélisation énergétique ouverte est donc amenée à se développer**, par le haut via des incitations et contraintes institutionnelles, mais également par le bas à l'initiative de groupe de recherche ou acteurs socio-économiques souhaitant en saisir les bénéfices. Ces pratiques répondent à **des enjeux récents mais urgents de développement de systèmes et usages énergétiques soutenables en lien avec les sphères économiques et socio-politiques.**

I.3.2. Approches épistémologiques dans le milieu de l'énergie & conséquences sur les objectifs et limites de la modélisation énergétique ouverte

Nous avons exploré le concept d'énergie dans la recherche et son histoire vis-à-vis de la modélisation et de l'ouverture des connaissances. Cette section s'attache à préciser ce qu'on entend par « connaissance » dans ce milieu, à travers une approche épistémologique⁴. Si un tel regard est rarement apporté lorsqu'il est question de Science Ouverte [63], Rohmer et al. [85] soulignent que de nouvelles méthodes et outils basées sur les connaissances doivent être développées et partagées pour faire face aux enjeux environnementaux.

Les travaux d'HDR de Frédéric Wurtz s'attachent à appliquer une approche épistémologique au domaine du génie électrique [137]. Ils soulignent que la conception en génie électrique traverse une crise car elle est enfermée dans un cadre épistémologique classique. L'**épistémologie classique** (ou positiviste, réductionniste, matérialiste, naïve) considère que [138] :

- Les **connaissances** sont **définies intrinsèquement** par la nature physique des choses (hypothèse ontologique), et les mêmes causes auront les mêmes effets (hypothèse **déterministe**).
- Les sous-systèmes sont régis par des lois élémentaires, et le fonctionnement du système global peut être obtenu par composition (principes d'**analyses réductionnistes**). Les nouvelles connaissances se basent uniquement sur des **raisonnements logiques**.
- La vérification est **expérimentale**.

Cette conception de la connaissance est utilisée de manière intuitive dans la plupart des disciplines scientifiques [63], et notamment le génie électrique [39]. Elle entre pourtant en contradiction avec certaines observations, par exemple le fait que les résultats des processus de conceptions ne sont pas indépendants des acteurs humains qui les manipulent, ou encore qu'il existe des incertitudes sur les objets de la connaissances (e.g. modèles, systèmes) et sur la connaissance elle-même [137]. Berendes et al. soulignent un autre symptôme : les chercheurs développant des outils de modélisation énergétique se concentrent souvent bien plus sur les fonctionnalités techniques que sur l'utilisabilité des outils [114]. Aussi un nouveau cadre épistémologique prenant en compte les acteurs humains est considéré. Ce cadre d'**épistémologie constructiviste** repose sur [138] :

- Des **connaissances dépendantes** d'une part **du contexte**, avec des théories et modèles dynamiques (hypothèse phénoménologique), et d'autre part **des objectifs** à atteindre pour les développeurs dans ce contexte (hypothèse téléologique).
- Une modélisation systémique, i.e. comprenant **contexte, objectifs et acteurs**, et les **connaissances** sont **argumentées et possibles** plutôt que démontrées et vraies.
- La validation par l'**effectivité**, i.e. la capacité pour la modélisation à être valide et/ou utile au sens de critères (e.g. être opérationnelle, transformative, interprétative ou actionnable) et ceci dans certains contextes donnés.

⁴ L'épistémologie est l'étude de la constitution de la connaissance.

Les connaissances sont donc des objets construits par les acteurs, et non déterminés par une nature intrinsèque. Ce cadre épistémologique est utile pour considérer la modélisation énergétique [23], et peut s'inscrire dans une vision « écologique » des sciences, i.e. favorisant la participation à partir de cultures scientifiques plurielles pour produire des connaissances robustes sur le long terme [63]. Il **légitime** en outre des approches de modélisation interdisciplinaires, considérant les acteurs humains avec leurs objectifs et leurs contextes [39], et en particulier **la modélisation énergétique ouverte** qui :

- Permet des processus itératifs d'amélioration continue (e.g. clarification, reformulation [39]) ouverts à la communauté scientifique, via la transparence et l'adaptabilité. On peut parler de **réursion**, où chaque cycle modifie profondément les méthodes, outils ou la connaissance des acteurs [137].
- Facilite la **dialogique**, i.e. la construction d'un ensemble cohérent de propositions complémentaires, concurrentes ou antagonistes pour représenter un phénomène [137,139] via la transparence et l'accessibilité.
- Met à disposition une étape identifiée comme essentielle : la **formulation des problèmes** [39,137,140] (i.e. le processus de modélisation [122] comprenant données, hypothèses et modèles), et pas seulement leur résolution (résultats).
- Accorde une importance aux données, méthodes, outils, mais également à la **confiance** qui leur est associée [141]. Les solutions ne sont pas absolument justes, mais *satisfaisantes* fonction de la rationalité limitée des acteurs modélisateurs [142,143], dont la confiance est donc à prendre en compte.

Concernant les connaissances portées par les acteurs humains, l'ingénierie des connaissances établit une distinction entre [144,145] :

- **Connaissances explicites** (ou savoirs) : peuvent être transmises en langage formel (e.g. l'écriture).
- **Connaissances tacites** (ou connaissances implicites) : difficiles à formaliser et communiquer, elles sont ancrées dans l'action, dans un contexte. Elles sont irréductibles, i.e. une part de la connaissance restera toujours tacite.

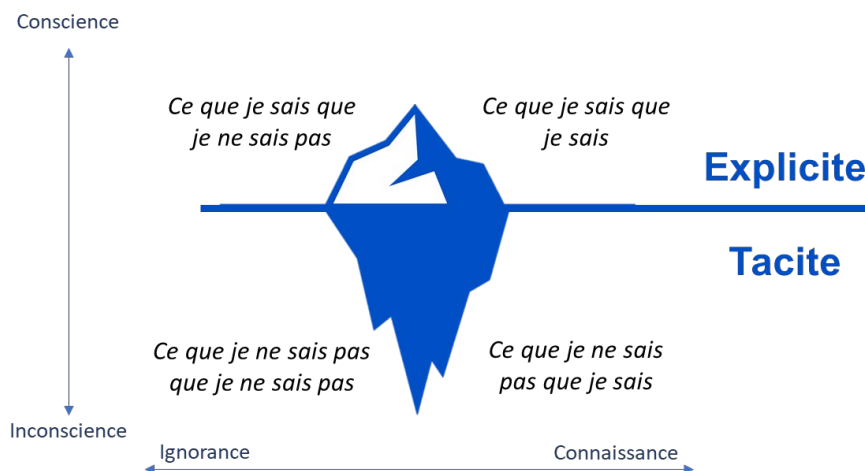


Figure I.11 : Représentation des connaissances tacites et explicites et processus de transferts.
Source : auteur à partir de [145].

Le passage d'un type de connaissance à l'autre se fera par :

- socialisation du tacite au tacite (interactions entre individus, e.g. observation & imitation),
- combinaison de l'explicite à l'explicite (e.g. addition, recontextualisation de connaissances),
- extériorisation du tacite à l'explicite (e.g. via des expériences partagées et des dialogues répétés autour de celles-ci), et
- intériorisation de l'explicite au tacite (proche de la notion d'apprentissage).

Grundstein [146] souligne que ces conversions peuvent suivre un axe de progrès depuis des connaissances individuelles non-formalisées et privées, vers des connaissances de plus en plus formalisées et disséminées.

→ Ces différentes notions amènent des **objectifs et limites supplémentaires** pour la modélisation énergétique ouverte :

- Il apparaît nécessaire de capitaliser et diffuser la modélisation énergétique dans sa complexité, i.e. ses **aspects techniques** (e.g. données, modèles, méthodes), mais aussi son **contexte** de développement, ses **parties prenantes** et leurs **objectifs**.
- Il faudra également garder un **lien avec les acteurs humains** derrière la modélisation et les mettre en interrelation, pour mobiliser des dynamiques vertueuses de dissémination et formalisation des connaissances.
- On constate néanmoins, dès lors, que l'ouverture des connaissances dans le domaine sera **limitée par définition**, car une part restera toujours nécessairement tacite. Aussi, si la science ouverte participe à réduire l'asymétrie des savoirs, elle ne peut l'effacer : chaque acteur reste détenteur d'une connaissance propre, tacite, relative à son expérience et à ses compétences. On peut alors chercher des espaces de compréhension communs, d'interopérabilité sémantique (ou « interopérabilité d'acteurs ») [122].

I.3.3. Les Low-Tech, incarnations alternatives d'ouverture dans le domaine de l'énergie

Avant de clore cette section et ce chapitre, et de présenter les approches de modélisation énergétique ouverte, nous abordons ici une incarnation alternative d'ouverture et de collaboration dans le domaine de l'énergie : les Low-Tech. Après avoir abordé l'historique et la définition du concept, nous verrons en quoi les Low-Tech peuvent être vecteurs d'ouverture et de collaborations.

I.3.3.1. *Historique des approches techniques alternatives*

Dans le contexte de crise pétrolière des années 1970, de nombreux courants de pensée cherchant à repenser la place de la technique dans nos sociétés fleurissent [147], avec la définition de technologies ...

- appropriées ou encore intermédiaires par Ernst Friedrich Schumacher [148], i.e. locales, décentralisées, simples et humaines. Elles sont basées sur des bien basiques, peu chères, répondant aux besoins essentiels
- conviviales de Ivan Illich [149], mettant l'outil au service de l'homme dans la collectivité.

- autonomes de André Gorz (ayant d'ailleurs théorisé les liens entre logiciel libre et luttes contre les dégâts socio-écologiques du capitalisme [150]).
- libératrices de Murray Bookchin [151], visant à éliminer les souffrances du travail et de l'insécurité matérielle ainsi que la centralisation du pouvoir économique, et renouant avec l'environnement.
- démocratiques de Lewis Mumford [152], mettant en avant la sobriété ainsi que l'habileté de l'être humain et son contrôle sur la technologie.

Comme nous l'avons évoqué dans la section I.3.1.2, ces approches mettant en avant la simplicité et le lien aux ressources et usages ont été dénigrées au XX^{ème} siècle dans les pays du Nord. De telles approches ont été mises en œuvres dans les pays du Sud par nécessité, répondant à la volonté d'inventer des modèles contextualisés, avec des appellations différentes selon les régions du monde : économie de la débrouille, innovations frugales (ou *jugaad*) ou sobriété contrainte [153].

Les Low-Tech arrivent aujourd'hui comme héritières de ces pensées, mais doivent relever les défis de la démocratisation (notamment par rapport aux technologies appropriées), sans tomber dans l'écueil du marché de masse (par rapport à l'innovation frugale) [154].

I.3.3.2. *Low-Tech : définition(s) et concepts proches*

La définition des Low-Tech est une question délicate, car différents courants et penseurs en donnent des conceptions proches mais selon des angles différents. Le Low-Tech Lab [155], association pionnière sur la question, les définit comme des objets, des systèmes, des techniques, des services, des savoir-faire, des pratiques, des modes de vie et même des courants de pensée, qui intègrent la technologie selon trois grands principes :

- **Utile** : réponse aux besoins de base, accès à l'énergie, à l'alimentation, à l'eau, à l'habitat, à l'hygiène. Les dispositifs conçus favorisent le développement d'une culture technique forte partagée dans les groupes sociaux.
- **Accessible** en termes de coûts, de ressources et de savoir-faire.
- **Durable** : systèmes réparables, robustes, modulaires, et limitant leurs impacts écologiques, sociaux ou sociétaux sur tout leur cycle de vie (e.g. utilisation de matériaux de réemploi).

L'ADEME adhère à cette vision et y ajoute deux notions : **local** et favorisant l'**autonomie** [156]. Il peut par exemple s'agir d'un four solaire pour de l'artisanat en boulangerie (Figure I.12), ou encore de services de collecte de toilettes sèches afin de boucler le cycle des nutriments entre agriculture & alimentation, comme illustré dans deux des *Enquêtes du Low-Tech Lab*⁵.

⁵ Les Enquêtes du Low-Tech Lab : <https://lowtechlab.org/fr/le-low-tech-lab/les-actions/les-enquetes-du-low-tech-lab>



Figure I.12 : Four solaire pour torr efaction - boulangerie. Source :   Julien Lemaistre - Low-tech Lab.

Philippe Bihoux, ingénieur et penseur de référence sur les Low-Tech avec son ouvrage *L'âge des Low-Tech*, en donne quant à lui une vision sociétale, et insiste sur les notions de **questionnement des besoins**. Il présente les Low-Tech comme sobres, durables, réparables, simples et peu dépendantes d'énergie fossile, mobilisant un travail humain digne [157]. Il recommande d'orienter les connaissances vers l'économie de ressources, et trouver un équilibre entre performances et convivialité.

I.3.3.3. *Low-Tech Recherche et Enseignement (LowTRE)*

Dans le milieu académique international, le concept de Low-Tech est peu connu, excepté pour certains articles relatifs abordant des approches systémiques du système productif [158,159], qui évoquent plutôt la définition littérale anglaise de « low-tech » i.e. basses technologies n'utilisant pas les méthodes ou technologies les plus récentes (*Cambridge Dictionary*). Ils évoquent ainsi low-tech comme des systèmes ne mobilisant pas d'énergie électrique ou fossile, avec parfois des démarches critiques mais sans y attacher tout le sens et les valeurs évoqués plus tôt. En France, on observe une émergence du concept de Low-Tech dans la recherche, avec de premiers écrits en urbanisme [160], ergonomie [161] ou sociologie [162], et un projet de recherche collaboratif sur la viabilité des Low-Tech [163]. L'approche commence également à être mobilisé en génie électrique, comme dans la thèse de Kathleen Mallard [18]. Carrey et al. proposent une définition pour le milieu de la recherche, en se basant sur leur expérience et les prémices de projets de métallurgie solaire : « une technologie est low-tech si elle constitue une brique technique élémentaire d'une société pérenne, équitable et conviviale » [164]. Le terme Low-Tech commence également à apparaître dans les textes institutionnels, en témoigne l'appel à projet conjoint du CNRS et de l'IRD de 2021 « Sciences frugales et innovation basse technologie (Low-Tech) » [165].

En juin 2020, un groupe grenoblois d'académiques et membres du tissu associatif a lancé la communauté LowTRE pour Low-Tech Recherche et Enseignement. Cette communauté a pour objectif de déclencher une prise de conscience et de décision dans le milieu universitaire sur la nécessité de repenser leurs activités en les adaptant aux défis actuels pour tendre vers une société sobre et résiliente. Cette communauté rassemble en 2022 plus de 150 membres sur un forum en ligne⁶ ainsi que dans des évènements (e.g. webinaires, ateliers de travail en ligne et journées d'échange), et est composée d'enseignants-chercheurs, de doctorants, d'étudiants, de membres du milieu associatif, de membres d'entreprises. Les premiers résultats issus de cette communauté présentent les démarches low-tech comme particulièrement pertinentes pour faire face aux crises évoquées et pour donner lieu à des projets d'enseignements motivants à la fois pour les étudiants et pour les enseignants.

I.3.3.4. *Les Low-Tech comme vecteurs d'ouverture et de collaboration face aux enjeux socio-écologiques*

Les Low-Tech apparaissent comme des solutions pertinentes pour **faire face aux enjeux socio-écologiques** : elles comportent intrinsèquement des valeurs de soutenabilité et d'inclusivité. Sans être des solutions idéales et uniques en tous contextes, elles questionnent justement les usages et évaluent les ressources locales, ce qui s'aligne bien avec le besoin de réflexivité sur ces questions. Si elles apparaissent encore peu dans la recherche, elles réclament pourtant d'importantes connaissances transdisciplinaires et expérientielles. Des bases théoriques solides sont en effet nécessaires pour développer des solutions utiles, durables, accessibles, autonomes, localement et en lien direct avec les différentes sphères de la société (e.g. les éoliennes Pigott et l'évaluation de leur pertinence en contexte [166]) : on peut parler de **High-Knowledge for Low-Tech**.

Les low-tech appellent au développement de pratiques adaptées et vertueuses au plus près des acteurs concernés, et nécessitent donc des approches de recherche participative enthousiasmantes à développer, notamment avec les acteurs du tissu associatif en avance sur la thématique. Les low-tech sont des objets praticables et perceptibles [167] pour aborder des sujets variés, allant de la physique à la philosophie et permettant la transdisciplinarité. Ils permettent, de par leur simplicité et donc leur accessibilité, de concevoir des systèmes complets bouclant le cycle de la théorie à la pratique [168] : ils sont donc à la fois de bons candidats pour retisser des liens entre milieu académique et société civile, et comme supports d'enseignement. Autrement dit, ils sont à la fois **objets frontières⁷ entre Science et société, et objets pédagogiques**.

Les low-tech s'inscrivent ainsi comme des solutions **effectives**, à savoir pertinentes et efficaces dans un contexte et pour des utilisateurs donnés. Le concept de Low-Tech est en effet flottant spatialement et temporellement, dans le sens où les ressources disponibles pour la conception

⁶ Lien vers l'instance de forum LowTRE : <https://forum-lowtre-ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/>

⁷ « Objets, abstraits ou concrets, dont la structure est suffisamment commune à plusieurs mondes sociaux pour qu'elle assure un minimum d'identité au niveau de l'intersection tout en étant suffisamment souple pour s'adapter aux besoins et contraintes spécifiques de chacun de ces mondes. » [3]

d'un objet technique ne seront pas les mêmes selon le lieu et l'époque où l'on se trouve. Elles s'inscrivent alors pleinement comme des solutions de choix dans un cadre constructiviste (section I.3.2).

Au-delà d'avantages quantitatifs en termes de maîtrise de l'énergie ou d'économies, les low-tech peuvent également donner confiance en sa capacité d'action, offrir des moments conviviaux autour de la pratique manuelle, ou encore accompagner la présentation des enjeux énergétiques⁸. Ce pouvoir encapacitant et ces différents apports seraient sans doute invisibilisés dans une épistémologie positiviste. En tissant des liens explicites entre les activités de conception, et les citoyens et leurs usages, les Low-Tech peuvent agir vers une déssectorisation des disciplines, la sectorisation en « champs » de plus en plus distincts et spécialisés ayant possiblement renforcé la pensée positiviste [169].

⁸ Cela a pu être expérimenté lors d'atelier de lutte contre la précarité énergétique avec des low-tech dans le cadre d'un projet étudiant.

I.4. Bilan

L'ÉNERGIE a un lien fort aux **enjeux socio-écologiques** (dépassement de frontières planétaires, accroissement des inégalités), nous invitant urgemment à s'emparer de ces questions dans la recherche de manière intègre et éthique. Face à la complexité des objets énergétiques, la **modélisation énergétique**, apparaît comme un outil de choix pour explorer différents scénarios de conception, opération ou planification énergétique, éclairant ainsi la réflexion et l'action des parties prenantes.

L'OUVERTURE des connaissances est incarnée par un mouvement émergent, la **Science Ouverte**, rassemblant différentes composantes selon les contenus ouverts : données (*open data*), codes sources (*open source*), articles (*open access*), ou encore processus de recherche participatifs incluant des acteurs non-académiques (*citizen science*). De plus en plus réclamée par les institutions et les scientifiques, elle a de nombreux intérêts, notamment dans le domaine de l'énergie où on parlera de **modélisation énergétique ouverte** :

- Améliorer la qualité scientifique
- Faciliter les collaborations
- Améliorer la fiabilité
- Favoriser l'accessibilité à tous publics

LES CONNAISSANCES, dans ce domaine comme dans d'autres disciplines, ne sont pas uniquement déterminées par la nature des objets, mais **portées par les acteurs humains** et dépendent de leurs objectifs et du contexte. Elles sont en outre composées de connaissances formalisables (explicites), et de connaissances tacites plus difficiles à formaliser et communiquer, dont une part sera irréductible. Ces considérations légitiment les travaux sur la modélisation énergétique ouverte, et en donnent des orientations supplémentaires, notamment sur la capitalisation du contexte de développement, des parties prenantes et de leurs objectifs, mais aussi des modes d'organisation et moyens pour la mise en relation des porteurs et porteuses de connaissances.

Le travail de synthèse de ce chapitre a donné lieu à un cours sur la Science Ouverte que j'ai construit pendant les travaux de thèse pour le semestre électif PISTE de Grenoble INP [170].

Ce premier chapitre pose ainsi le décor des axes de recherche qui guideront le déroulé de la thèse :

- Si l'ouverture de la modélisation énergétique apparaît comme réclamée et utile, quelles sont les outils et pratiques de modélisation énergétique ouverte ? *Chapitre 2*
- La modélisation énergétique ouverte fait face à des freins et limites (e.g. surcharge d'informations, manque d'acculturation, utilisabilité, ...), quelles méthodes permettraient d'y faire face, notamment dans un cadre d'épistémologie constructiviste ? *Chapitre 3*
- Comment déployer la modélisation énergétique et ces méthodes nouvelles sur des cas d'application concrets ? *Chapitre 4*
- L'ouverture des connaissances fait face à un paradoxe : il s'agit de mettre à disposition les connaissances, mais une part de la connaissance tacite ne pourra pas être formalisée. La mise en interrelation des parties prenantes pouvant favoriser la dissémination et formalisation des connaissances, on peut alors se demander : quels moyens mobiliser pour mettre en relation des acteurs porteurs de connaissances ? Et comment en qualifier la pertinence ? *Chapitre 5*

Chapitre II

Les outils et pratiques de modélisation énergétique ouverte

« Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles » George Box

SOMMAIRE

Chapitre II	Les outils et pratiques de modélisation énergétique ouverte	44
	Résumé du chapitre.....	45
II.1.	Comment s’incarne la modélisation énergétique ouverte	46
II.2.	Ouvrir la modélisation énergétique : quoi et comment ?	46
II.2.1.	Déterminer les éléments du processus de modélisation énergétique à ouvrir..	46
II.2.1.1.	Éléments des processus de modélisation énergétique ouverts dans la littérature	46
II.2.1.2.	Choix des éléments à ouvrir.....	47
II.2.1.3.	Idées reçues quant à l’ouvertures de ressources de modélisation énergétique	48
II.2.2.	Comment ouvrir des ressources de modélisation énergétique.....	49
II.2.2.1.	Ouverture juridique : le choix des licences pour les ressources de modélisation énergétique	49
II.2.2.2.	Ouverture technique : mise à disposition et organisation sur le long terme	50
II.3.	Stratégie de développement des outils de modélisation énergétique	52
II.3.1.	Stratégie et niveaux d’ouverture pour le développement des outils	52
II.3.2.	Ouverture ou contribution pour les outils de modélisation.....	53
II.3.3.	Caractéristiques des outils de modélisation énergétique	54
II.3.3.1.	Définition et variété des outils de modélisation énergétique.....	54
II.3.3.2.	Phases d’étude des systèmes énergétiques	55
II.3.3.3.	Approches analytiques et de modélisation.....	57
II.3.3.3.a.	Approches de modélisation.....	57
II.3.3.3.b.	Approches analytiques	57
II.3.3.4.	Échelles et résolutions temporelles et spatiales.....	58

II.3.3.4.a.	Échelle géographique	58
II.3.3.4.b.	Horizon et résolution temporels.....	59
II.3.3.5.	Vecteurs énergétiques.....	59
II.3.3.6.	Utilisabilité et accessibilité aux publics	59
II.3.3.7.	La considération des aspects sociaux.....	61
II.3.3.8.	Modélisation énergétique ouverte à l'échelle du composant ?.....	63
II.3.4.	Développement d'un outil de modélisation énergétique ouverte : l'exemple de OMEGAlpes.	64
II.3.4.1.	Historique et développement ouvert.....	64
II.3.4.2.	Caractéristiques de OMEGAlpes.....	65
II.3.4.3.	Positionnement par rapport à l'existant	68
II.3.4.4.	Retour d'expérience de développement.....	69
II.4.	Reproductibilité des processus de modélisation énergétique ouverte	69
II.4.1.	Reproductibilité des processus dans le milieu de l'énergie : cadrage.....	69
II.4.2.	Les notebooks, des objets supports pour l'ouverture et la reproductibilité.....	72
II.4.2.1.	De la programmation lettrée aux notebooks	72
II.4.2.2.	Définition et usages des notebooks.....	72
II.4.2.3.	Bonnes pratiques et fonctionnalités des notebooks	75
II.4.2.4.	Limites et perspectives pour les notebooks	75
II.5.	Bilan.....	78

Résumé du chapitre

Ce chapitre présente comment la modélisation énergétique ouverte s'incarne. Dans les processus de modélisation d'abord, avec la question des éléments à rendre accessibles, et dans les pratiques d'ouverture avec des questions juridiques et techniques. Le développement des outils de modélisation énergétique ouverte est une étape clef, et implique notamment de choisir entre un développement propre ou la contribution à des outils existants. Les caractéristiques des outils de modélisation sont détaillées, avant de fournir une présentation réflexive de la stratégie de développement de l'outil OMEGAlpes. Enfin, la notion de reproductibilité et les notebooks comme supports de cette dernière sont clarifiés.

II.1. Comment s'incarne la modélisation énergétique ouverte

Dans ce chapitre, nous cherchons à explorer comment s'incarne concrètement la modélisation énergétique ouverte. Face au constat de la nécessaire ouverture de la modélisation, comment en déployer les outils et pratiques de manière ouverte ? Nous nous interrogeons ici sur les ressources à ouvrir au sein du processus de modélisation énergétique ouverte, et comment les ouvrir, avec une attention particulière portée à la variété d'outils de modélisation énergétique, mais aussi aux données et résultats. Enfin, la notion centrale de reproductibilité des processus de modélisation énergétique ouverte, et les objets dans lesquels elle peut se retranscrire sont documentés.

II.2. Ouvrir la modélisation énergétique : quoi et comment ?

II.2.1. Déterminer les éléments du processus de modélisation énergétique à ouvrir

II.2.1.1. Éléments des processus de modélisation énergétique ouverts dans la littérature

Avant de considérer quels éléments ouvrir dans un processus de modélisation énergétique, commençons par désigner ce que serait un **processus de modélisation énergétique ouverte**. Différents auteurs les ont décrits dans la littérature. Pfenninger et al. nous présentent un processus linéaire de modélisation énergétique, depuis les données brutes jusqu'à l'interprétation des résultats en passant par les modèles, en spécifiant la place de l'open data, de l'open source et de l'open access [87]. Robbie Morrison adjoint à cette vision des actions et ressources supplémentaires, telles que les différentes sources de données ouvertes, ou les différents modes de diffusion des résultats [84]. Cao et al. quant à eux soulignent la place des flux d'information et notamment des hypothèses, en plus des flux de données [94]. Enfin Hülk et al. reprennent la proposition de Cao et al. pour l'intégrer à leur formalisme de scénario énergétique au sein de l'Open Energy Platform : un scénario énergétique utilise un modèle énergétique lui-même issu d'un outil de modélisation, et ces trois éléments doivent être documentés au moyen de fiche technique ou *fact sheets* [171].

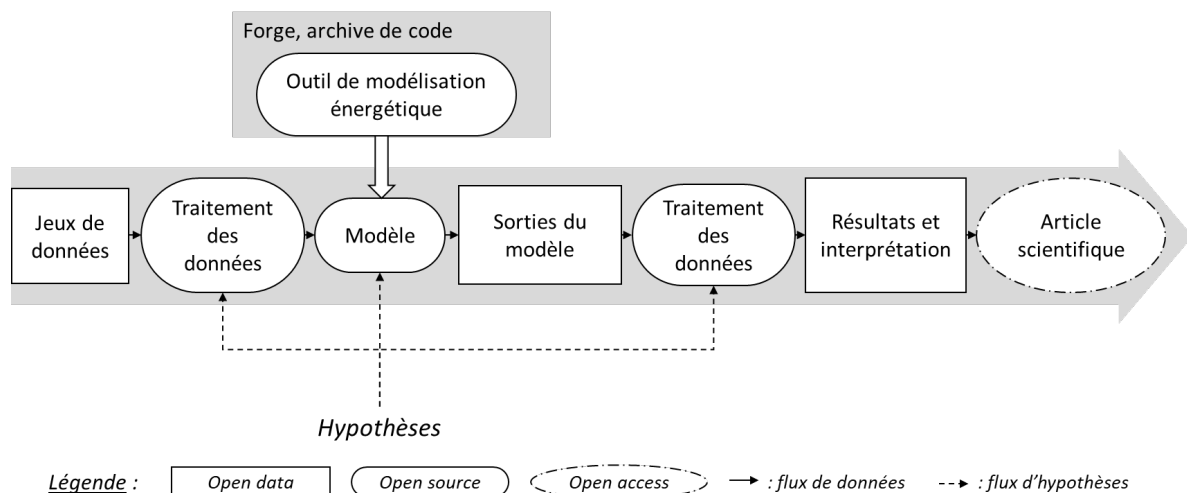


Figure II.1 : Éléments d'un processus de modélisation énergétique ouvert. Source : auteur d'après [84,87,94].

La Figure II.1 présente une vision synthétique du processus de modélisation énergétique à partir de ces propositions. Par la suite, on appellera ressource ou élément du processus de modélisation énergétique une des étapes présentées dans cette figure.

II.2.1.2. *Choix des éléments à ouvrir*

La **science ouverte** est souvent évoquée dans le milieu de la recherche pour faire référence à la mise à disposition libre et gratuite des articles de recherche [113], car c'est la première étape réclamée par les institutions (section I.2.3). Or comme nous l'avons vu, elle recouvre différents aspects du processus de la recherche : l'ouverture des données (open data), des outils et codes associés (open source) et des résultats présentés dans des articles (open access). La modélisation énergétique ouverte ne fait pas exception et présuppose des modèles énergétiques ouverts, avec des données ouvertes les alimentant et des résultats gratuits et accessibles. Or parmi ces éléments, certains ne pourront pas être mis à disposition : par exemple pour des raisons de respect de la vie privée dans le cas de données de consommations énergétiques, ou de propriété intellectuelle liée au modèle stratégique d'une entreprise dans le cas de modèles énergétiques.

Ainsi, déterminer les éléments du processus de modélisation énergétique à ouvrir est une question essentielle. Pour y répondre, on peut commencer par appliquer la stratégie de l'Union Européenne, « *as open as possible, as closed as necessary* » [172] : aussi ouvert que possible, aussi fermé que nécessaire.

Dans le cas de données sensibles, par exemple pour des données privées (e.g. consommation électrique d'un ménage), des jeux de données qui les contiennent peuvent être partagés une fois que l'ensemble a été anonymisé (on parle de méthode *Safe Harbor*), ou qu'un expert a déterminé que le jeu de données n'est pas individuellement identifiable (on parle d'*Expert Determination*) [61]. Si les jeux de données ne peuvent passer par ces méthodes, des données synthétiques peuvent être mises à disposition. Ce concept proposé par Rubin [173] renvoie à des données ayant une structure, un contenu et une distribution similaires aux données réelles et visant à atteindre une "validité analytique". Différents guides existent pour organiser le plan de gestion des données (désormais obligatoire pour la plupart des projets de recherche financés, par l'ANR par exemple), tel que celui proposé par le Consortium européen d'archive de données en science sociale (CESSDA) [61,174].

Une des premières questions à se poser est donc celle de la détention de la propriété intellectuelle, pour déterminer ce qu'il est nécessaire de maintenir fermé, et ce qu'on a le droit d'ouvrir. In fine, l'ouverture des ressources de modélisation énergétique dépendra de la décision des acteurs détenant la propriété de ces ressources, qui pourront faire ou non le choix de l'ouverture, pour des raisons indiscutables s'il s'agit de ressources sensibles, ou encore pour des raisons de stratégie de développement. Mettre à disposition ne serait-ce qu'une partie des données et des codes utilisés est un premier pas sur le chemin de l'ouverture des processus, et permet de commencer à se questionner sur les ressources à partager [36]. La notion d'ouverture des ressources n'est donc pas binaire : tout ou partie du processus de modélisation énergétique peut être ouvert. Morrison distingue notamment trois motivations à l'ouverture,

qui mobilisent des pratiques d'ouvertures qui seront abordées dans la section suivante II.2.2) [84] (Tableau 1).

<i>Motivations</i>	Transparence publique	Reproductibilité scientifique	Développement ouvert
<i>Éléments clefs à ouvrir, pratiques</i>	Données, résultats, documentations des modèles accessibles	Données et code, licence ouverte et versionnage	Forge logicielle ⁹ , gouvernance
<i>Bénéfice et public visé</i>	Accompagner les politiques publiques à partir de la modélisation, préserver la confiance du publique	Répéter les analyses au sein de la communauté scientifique	Collaborer au sein de la communauté scientifique

Tableau 1 : Motivations à l'ouverture de la modélisation énergétique. Source : auteur d'après Morrison [84].

Les licences permettront ensuite de définir différents niveaux de partage pour les ressources (section II.2.2.1).

II.2.1.3. Idées reçues quant à l'ouvertures de ressources de modélisation énergétique

Certaines **idées reçues** quant aux risques de l'ouverture des codes en particulier sont également à contrecarrer, comme exprimé par Nick Barnes [108] :

- La peur de l'exposition : « Les gens vont chercher la moindre erreur, et réclamer des corrections et du support »
 - Si le code est assez bon pour faire la tâche souhaitée, alors il est assez bon pour être publié, et sa publication aidera la recherche du domaine. De plus le partage de code peut permettre à d'autres de l'améliorer [61]. En outre, personne n'a le droit d'exiger un support technique pour un code fourni librement.
- La question de la valeur : « ce code est de la propriété intellectuelle valorisable qui appartient à mon institution »
 - Si cette idée peut s'avérer correspondre au modèle économique de certaines institutions et poser des questions de sensibilité commerciale [87], des entreprises mènent des projets ouverts, bénéficiant des avantages associés (section I.3.1.2). La valeur peut en outre résider dans l'expertise de l'auteur, dans sa connaissance implicite autour de la modélisation (e.g. par l'adaptation d'un modèle énergétique à un contexte spécifique) [36].
- La consommation de temps : « cela demande trop de temps de mettre en forme le code ».
 - S'il est vrai que la mise en forme de code et de documentation de qualité réclament du temps [175] voire une ressource humaine dédiée [51], les bonnes pratiques de développement permettent d'en économiser aussi bien pour un usage du code en interne (e.g. lorsqu'on souhaite réutiliser du code après quelques semaines) qu'en

⁹ i.e. plateforme de développement collaboratif en ligne

externe via un collectif (e.g. via la réduction des efforts parallèles). De plus des retours d'expériences suggèrent que l'augmentation des citations, les collaborations, et contributions externes contrebalancent facilement le temps dépensé [84,87].

On notera que des idées reçues qui à l'inverse, considèreraient que la seule ouverture des ressources de modélisation énergétique est suffisante à la construction d'une communauté, à la collaboration et aux contributions sont aussi fallacieuses. Pour que des personnes contribuent, il faut qu'elles y trouvent un intérêt : adaptation à leurs besoins, reconnaissance scientifique ou technique, etc. [176].

II.2.2. Comment ouvrir des ressources de modélisation énergétique

Une fois que le choix des ressources de modélisation énergétique à ouvrir est clarifié, comment les ouvre-t-on concrètement pour les rendre utilisables par d'autres ? Pour répondre à cette question, on peut décomposer l'ouverture en deux composantes :

- l'**ouverture juridique**, au moyen d'une licence, et
- l'**ouverture technique** i.e. la mise à disposition gratuite et le devenir sur le long terme.

II.2.2.1. Ouverture juridique : le choix des licences pour les ressources de modélisation énergétique

Pour partager des ressources de modélisation énergétique de manière ouverte, la seule mise à disposition en ligne ne suffit pas : un contenu accessible en ligne est par défaut protégé par le droit d'auteur, et donc juridiquement non utilisable par des tiers. Attribuer une licence ouverte à un travail, qu'il s'agisse d'un article, d'un jeu de données ou d'un autre type de production, permet au titulaire du droit d'auteur d'établir les conditions dans lesquelles son travail peut être consulté, réutilisé et modifié.

Il existe différents types de licence libres.

- Adaptées au contenu :
 - Certaines licences sont assez **généralistes** et peuvent aussi bien être appliquées à des œuvres artistiques qu'à des travaux scientifiques, les plus connues étant sans doute les licences *Creative Commons*.
 - Ces dernières ne sont toutefois pas adaptées à toutes les ressources. Des licences plus **spécifiques** sont notamment recommandées pour accompagner les logiciels, (e.g. les licences Apache ou GNU).
- Plus ou moins permissives [51,84]:
 - **Domaine public** : permet de diffuser sans aucune restriction des contenus (e.g. CC0 public Domain).
 - Critère d'**attribution** : les licences autorisent l'utilisation, le partage et l'adaptation, tant que la source et l'auteur sont crédités. Ces dernières sont souvent fortement sollicitées dans le cas de partenariats avec des acteurs industriels.
 - Critère de **partage dans les mêmes conditions** : ce critère supplémentaire impose la diffusion des ressources dérivées sous la même licence que l'originale. On parle aussi de licences avec obligation de réciprocité ou *copyleft*, qui empêchent l'appropriation de ressources ouvertes dans des banques

fermées. Les contenus sous ce type de licence peuvent être considérés comme des Communs informationnels [177] (voir l'Annexe 2).

- Critères d'**utilisation non-commerciale, d'absence de modification** : ces critères supplémentaires empêchent une utilisation commerciale ou la modification de la ressource originale. Il est bon de noter qu'avec ces critères, on sort des définitions de « contenu libre » des acteurs du domaine tels que l'Open Knowledge Foundation [56], l'open content definition [58], ou le Free Cultural Works soutenu Creative Commons [57], car ces critères contraignent la révision, réutilisation et/ou la redistribution de la ressource.

Les licences doivent donc être choisies selon l'usage et le cadre que l'on souhaite définir pour une utilisation externe des ressources. Par exemple, si les licences *copyleft* contribuent à la diffusion des pratiques d'ouverture, les licences permissives peuvent permettre des collaborations avec un plus grand nombre de parties prenantes. A noter que le choix de la licence ne revient pas aux auteurs, lorsqu'ils ne sont pas les ayants droit, et que la licence choisie doit être compatible avec les licences des dépendances logicielles utilisées [84]. Par exemple un code source faisant appel à des codes sources externes partagés sous des licences copyleft (e.g. GNU GPL 3.0) devra adopter la même licence ou une licence ouverte compatible.. Teresa Gomez-Diaz présente une approche exhaustive des questions juridiques dans la production de logiciels [178]. Dans le domaine de la modélisation énergétique, Robbie Morrison a notamment produit des ressources pour le choix et la compréhension de licences, aussi bien pour les données [179] (page 14) que pour les outils de modélisation énergétiques [84] (se rapporter notamment au tableau 2 et à la figure 3). Pour faciliter le choix et l'application concrète de licences, j'ai moi-même produit un guide contributif consultable en ligne¹⁰.

II.2.2.2. *Ouverture technique : mise à disposition et organisation sur le long terme*

D'après la définition de l'Open Knowledge Foundation : « Le savoir ouvert correspond à tout contenu, information ou donnée qui peut être librement utilisé, réutilisé et diffusé, sans aucune restriction légale, technologique, ou sociale » [56]. Aussi si la restriction légale est couverte par le choix d'une licence libre, les restrictions technologique et sociale sont quant à elles couvertes par l'**accès gratuit en ligne** à la ressource complète, dans un **format ouvert** (i.e. ne nécessitant pas de logiciels payants pour y accéder¹¹), qui soit **lisible** par une machine et **compréhensible** par des acteurs humains.

Pfenninger et al. [87] partagent des considérations clefs supplémentaires lors de l'ouverture de processus de modélisation énergétique. D'abord avec la **documentation** des ressources mises à disposition, en plus du format ouvert. Cela passe notamment par l'utilisation de **métadonnées**, i.e. des informations décrivant, présentant ou mettant en relation des ressources [180]. Les métadonnées peuvent être administratives, descriptives, structurelles, de référence, de provenance et statistiques [181] (un exemple est fourni dans le Tableau 2), et sont utilisées

¹⁰ Guide contributif pour le choix d'une licence : https://pad.lescommuns.org/choix_licence_ouverte

¹¹ Liste de formats de fichiers ouverts : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_open_file_formats

par différents publics [182]. Les métadonnées sont essentielles pour rendre les données énergétiques FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) [61,181].

- *Faciles à trouver* pour les humains et les ordinateurs, avec des identifiants pérennes.
- *Accessibles* via leur identifiant à l'aide d'un protocole de communication standardisé et ouvert, et les métadonnées devraient être disponibles même lorsque les données ne le sont pas ou plus.
- *Interopérables*, le format des données doit leur permettre d'être combinées et utilisées avec d'autres données ou outils. Cela s'applique tant au niveau des données qu'à celui des métadonnées.
- *Réutilisables* dans différents contextes avec des métadonnées et données bien décrites, notamment par la déclaration d'une licence.

La définition de métadonnées améliore considérablement la transparence, notamment dans le contexte interdisciplinaire et complexe de la transition énergétique [182]. Définir des métadonnées communes pour des ressources de modélisation énergétique peut toutefois nécessiter une ontologie au sein du domaine (i.e. une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée [183]). Or si des propositions telles que l'Open Energy Ontology [184] émergent, les ontologies dans ce domaine sont pour l'instant lourdes à développer, maintenir et utiliser [180], et restent limitées, notamment en terme de lecture par des machines [182].

Titre	Données d'irradiance à Grenoble en 2019	} Descriptives
Description	Données d'irradiance à Grenoble comprenant le DHI et DNI	
Date de publication	2020	} Administratives
Contexte spatial	Grenoble, 21 avenue des Martyrs	
Contexte temporel	2019, pas de temps horaire	
Licence	Public Domain Dedication and License version v1.0.	
Nom du fichier	irradiance_data.csv	} Structurelles
Format	.csv	
Source	https://mhi-srv.g2elab.grenoble-inp.fr/django/API/	} Provenance
Contributeurs	Delinchant B. and Laranjeira T.	
Resource	Delinchant B., Wurtz F., Ploix S., Schanen J.-L. and Marechal Y. (2016). "GreEn-ER Living Lab - A Green Building with Energy Aware Occupants". SmartGreen'16, In proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems. ISBN 978-989-758-184-7, pages 316-323. DOI: 10.5220/0005795303160323	} Référence

Tableau 2 : Exemple de métadonnées pour des données d'irradiances. Source : auteur, basé sur le formalisme OEmetadata¹².

La distribution des ressources sur des **plateformes** dédiées est une autre considération clef. En particulier pour les outils de modélisation énergétique, le code source peut tout à la fois [1] :

¹² Pour une description complète de ce formalisme : https://github.com/OpenEnergyPlatform/oemetadata/blob/develop/metadata/latest/metadata_key_description.md

- mobiliser des systèmes de **versionnage** qui permettent de conserver l'historique de développement (e.g. git, Mercurial, Subversion),
- être hébergé sur des **forges logicielles**, i.e. des plateformes de développement collaboratif en ligne (e.g. Github, Gitlab, BitBucket ou encore SourceSup [51]), et
- être **archivé** dans des plateformes pour en pérenniser l'accès et disposer d'une référence citable (e.g. Software Heritage pour les codes sources [185], mais aussi Dataverse, Zenodo ou des *data papers* pour les données [61,186], et HAL pour les publications ouvertes). En effet les forges logicielles ne sont pas des archives pérennes : les projets qu'elles contiennent peuvent être modifiés ou effacés, comme Google Code et Gitorious en 2015.
- être **diffusé** et identifié dans des inventaires d'outils (ou base d'information sur les logiciels [51]), comme par exemple ceux d'openmod [90] ou de l'Open Energy Platform [187].

Des considérations supplémentaires abordées par Pfenninger sont le choix de l'outil de modélisation qui sera traité dans la suite de ce chapitre, et le support de la communauté d'utilisateurs et développeurs qui sera abordé dans les chapitres suivants, et en particulier le Chapitre V.

II.3. Stratégie de développement des outils de modélisation énergétique

II.3.1. Stratégie et niveaux d'ouverture pour le développement des outils

Concernant l'activité de modélisation en tant que telle, il est nécessaire de bien définir et préciser la stratégie et la philosophie de développement de modélisation énergétique :

- *POURQUOI* ? quel est l'**objectif** lors du développement [23] : disposer d'un outil de qualité pour mener à bien des études, développer un nouveau paradigme, de nouvelles fonctionnalités, apprendre à développer des modèles, ... ?
- *QUAND* ? Dans quelle **phase d'étude** du système énergétique ?
- *QUOI* ? quelles **fonctionnalités et formalismes** sont nécessaires pour l'utilisation ou le développement de l'outil ?
- *QUI & COMMENT* ? quelle **diffusion** du projet est visée : à quelles communautés s'adresse-t-on, et avec quel niveau de partage (i.e. quelle licence) ?
- et bien sûr en lien avec ces deux dernières questions : est-ce que des **outils existants** répondent déjà à ces critères de fonctionnalités, formalismes, et diffusion ?

Comme abordé dans la section II.2.1.2, différents niveaux d'ouverture sont possibles. Dans le cas des outils de modélisation énergétique, la Figure II.2 en présente un spectre allant du moins au plus ouvert. D'abord avec outils propriétaires commerciaux, puis avec une description ouverte, i.e. avec un résumé méthodologique, une documentation générale et des liens vers les résultats et les applications, et enfin gratuits (également appelés *freemium*) [37]. Ensuite avec les outils open-source mais avec des dépendances à des logiciels propriétaires (e.g. des algorithmes de résolution). Et enfin des outils open-source avec un choix de licence plus ou moins permissif.



Figure II.2 : Spectre des niveaux d'ouverture pour les outils de modélisation énergétique. Source : auteur.

II.3.2. Ouverture ou contribution pour les outils de modélisation

Concernant la stratégie de développement d'un outil de modélisation énergétique ouvert, deux voies sont alors possibles :

- développer son propre outil de modélisation de manière ouverte (*going open*), ou bien
- utiliser voire contribuer à un outil de modélisation énergétique ouverte existant (*joining open*).

Si le choix entre ces voies est peu abordé dans la littérature, notre expérience de développement interne de l'outil de modélisation énergétique ouverte OMEGAAlpes [188] nous a permis de dégager différents avantages pouvant justifier le développement d'un outil propre par rapport à une utilisation et contribution (cette stratégie est présentée en détail dans la section II.3.4.4). Ce cas d'étude de déploiement d'un projet open-source nous a notamment permis d'avoir une connaissance profonde et un contrôle total de l'outil, pour des collaborations de recherche avec d'autres laboratoires, et pédagogiques avec des écoles. Des échanges au sein de la communauté *openmod* [88] nous ont toutefois permis de nuancer ces intérêts par rapport à la contribution à des outils existants (Tableau 3). Sans même parler de contribution, un sondage auprès de 58 développeurs de cette communauté indique que seule la moitié d'entre eux utilisent d'autres outils ouverts que ceux qu'ils développent eux-mêmes [189]. Le foisonnement de développements d'outils propres et leur usage en interne peut apparaître comme une étape nécessaire étant donné le court historique de la modélisation énergétique ouverte (section I.3.1.2). Il permet en effet la diversification et la complémentarité entre les outils de modélisation énergétique de l'écosystème, plutôt que de poursuivre un hypothétique outil unique, a priori inatteignable étant données la complexité de l'objet énergétique et la variété d'approches à mobiliser en fonction de l'objectif [23,190–192]. Néanmoins, il provoque des efforts parallèles que les pratiques de développement ouvert sont censées éviter, créant des communautés rassemblées autour d'outils dispersés au lieu de rassembler autour d'outils de référence éprouvés. Il est bon de noter que pour choisir un outil auquel contribuer, un vrai travail d'état de l'art, de comparaison et de tests des candidats potentiels ne sera pas à négliger.

<i>Going open</i>	<i>Joining open</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Développement d'un formalisme propre et adapté à ses besoins. - Connaissance profonde de l'historique des choix de développement, et du fonctionnement de l'outil. - Contrôle total de l'outil pour le développement facilité de projets avec des acteurs locaux. - Visibilité de l'équipe de développement et du laboratoire, affirme une identité pour des collaborations et financements. - Diversité des outils de modélisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des efforts parallèles, - Support d'une communauté importante de développeurs et utilisateurs, - Création d'outils de référence éprouvés, - Collaboration entre équipes de recherche.

Tableau 3 : Avantages du développement propre (going open) ou de la contribution (joining open) pour des outils de modélisation énergétique ouverte. Source : auteur.

Dans les deux cas, rappelons que la modélisation énergétique ouverte dispose de nombreux avantages (section I.2.5), et permettra en outre de découvrir les principes de développement ouvert et collaboratif (e.g. utilisation de licences ouvertes, de git), et de développer des fonctionnalités propres à ses besoins particuliers, que ce soit par le développement sur un outil propre ou par la contribution à l'existant.

Pour faire un choix entre ces deux voies, il apparaît nécessaire de **comprendre** les caractéristiques principales des outils de modélisation énergétique, et de **connaître** l'existant.

II.3.3. Caractéristiques des outils de modélisation énergétique

II.3.3.1. Définition et variété des outils de modélisation énergétique

Nous menons dans cette section un travail de définition et d'état de l'art des caractéristiques des outils de modélisation énergétique, tout en introduisant des outils de modélisation énergétique ouverts existants, et répondants à ces caractéristiques.

Les **outils de modélisation énergétique** (section I.1.3) sont des outils informatiques ou formalismes de modélisation qui génèrent des modèles [32]. Ces **modèles énergétiques** sont des ensembles mathématiques cohérents comprenant un ensemble d'équations pour analyser les phénomènes d'un système complexe [94]. Ils sont par exemple développés pour certaines régions ou technologies. Différents **cas d'étude**, ou scénarios, peuvent ensuite être générés à partir du modèle avec des paramétrages, hypothèses ou objectifs spécifiques. Outils, modèles et cas d'étude représentent trois niveaux dans la modélisation, tels qu'identifiés par l'Open Energy Platform (OEP) notamment [171,187]. Par exemple, OMEGAAlpes est un outil générant des modèles d'optimisation linéaires à l'échelle quartier, avec notamment des modèles d'autoconsommation photovoltaïque, permettant d'explorer différents cas d'étude selon les données d'entrée, objectifs, et hypothèses choisies [188] (Figure II.3).

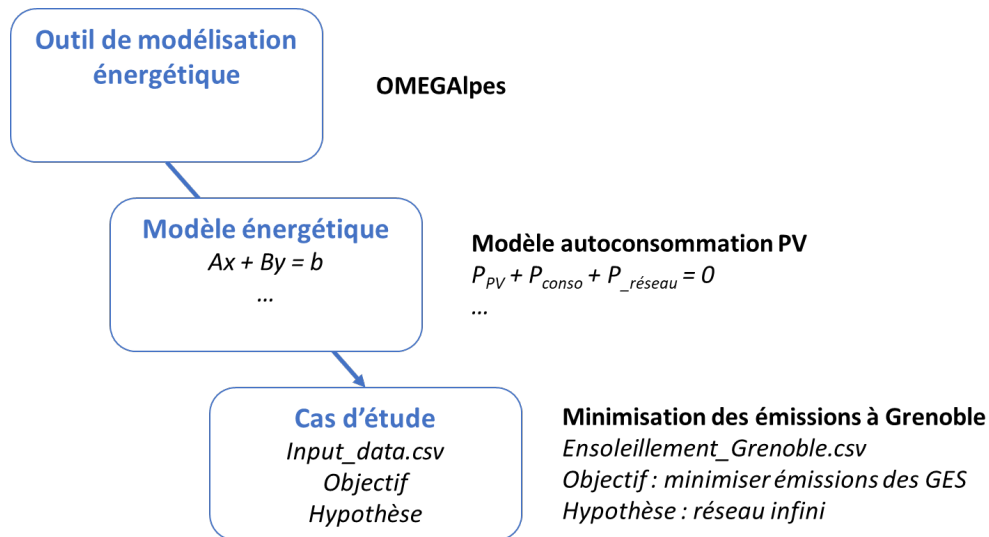


Figure II.3 : Illustration des outils, modèle et cas d'étude pour la modélisation énergétique.
 Source : auteur

Il existe un très large éventail d'outils de modélisation énergétique [32,105,130]. Comme le soulignent Chang et al. [32], les revues de littérature se sont concentrées sur divers aspects des outils, avec bien sûr leurs fonctionnalités et leurs domaines, mais aussi leurs applications pratiques, leur efficacité, ainsi que leur pertinence politique et leur transparence. La littérature permet d'identifier les principales caractéristiques qui devraient être examinées lors du développement ou du choix d'un outil de modélisation énergétique. La liste suivante propose une manière de considérer ces caractéristiques pour le choix d'un outil de modélisation énergétique pertinent face à un objectif donné [188].

1. Approches analytique et de modélisation [32,43,112,130,193–195].
2. Échelles et résolutions spatiales et temporelles [32,112,130,193,196].
3. Couplage de vecteurs énergétiques [32,43,130,194–196].
4. Niveau d'accessibilité [32,130,194].
5. Aspects sociaux et pertinence politique [32,101,103,107,112].

Ces caractéristiques sont discutées dans les sous-sections suivantes, et un tableau des outils de modélisation énergétique et de leurs caractéristiques est disponible en Annexe 6. La littérature souligne également des caractéristiques supplémentaires telles que les capacités techniques des outils [43,105], et notamment les fonctionnalités de flexibilité [130], le couplage de modèle, les analyses de sensibilité [23,32], le temps de résolution [195,196], et la granularité technologique [112,197]. Des concepts généraux sont aussi soulignés, tels que la flexibilité dans le niveau de détail et de description, le langage de modélisation et les niveaux d'abstraction [43,105], ou encore l'importance de la précision des modélisations de réseaux de chaleur [32,194,196].

II.3.3.2. Phases d'étude des systèmes énergétiques

On l'a vu, identifier correctement l'objectif (POURQUOI ?) et la phase de l'étude (QUAND ?) auxquels un outil de modélisation énergétique est destiné est une première étape avant de considérer ses caractéristiques (QUOI ?). La conception d'un système énergétique, comme toute conception, comprend différentes **phases**, avec notamment [198,199] :

1. Les études préliminaires (ou pré-études) : définition du cahier des charges, des contraintes et objectifs.
2. Le concept : prédimensionnement des éléments clefs du système énergétique.
3. La définition : mise à jour des modèles et dimensionnement des équipements techniques.
4. Le développement : dernières mises à jour des modèles avant l'implémentation.

Durant la phase de pré-étude, les possibilités d'action sont les plus grandes, et c'est donc à ce stade que les décisions ont le plus d'impact sur les objectifs de l'étude. Cette phase de pré-étude comporte un degré élevé de liberté, tout en étant l'étape du processus de conception qui influence le plus les coûts [140], comme cela a été souligné dans les domaines de l'architecture [199], de l'aéronautique [198] et de l'électronique de puissance [200] (Figure II.4).

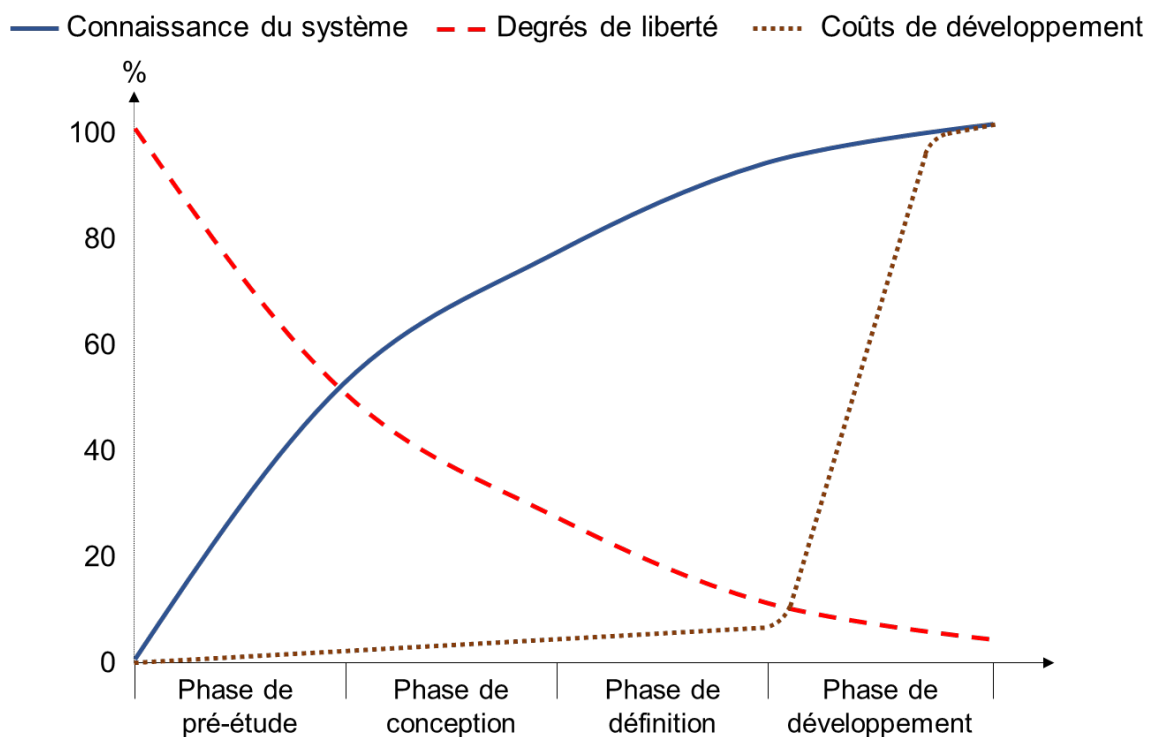


Figure II.4 : Coûts et connaissance d'un système suivant les différentes phases. Source : auteur à partir de Fernandez et al. [201] et Zablitz et Zimmer [198].

Dans le même temps, par définition, peu de connaissances sur le système à concevoir sont disponibles durant cette phase de pré-étude, ce qui implique de grandes incertitudes prédictives, rendant l'usage de modèles complexes contreproductif [201] (Figure II.5). Mobiliser un outil de modélisation et d'aide à la décision ouvert dans les phases de pré-étude, pour explorer de manière transparente un large éventail de possibilités, y compris dans leurs aspects opérationnels [122], est donc essentiel.

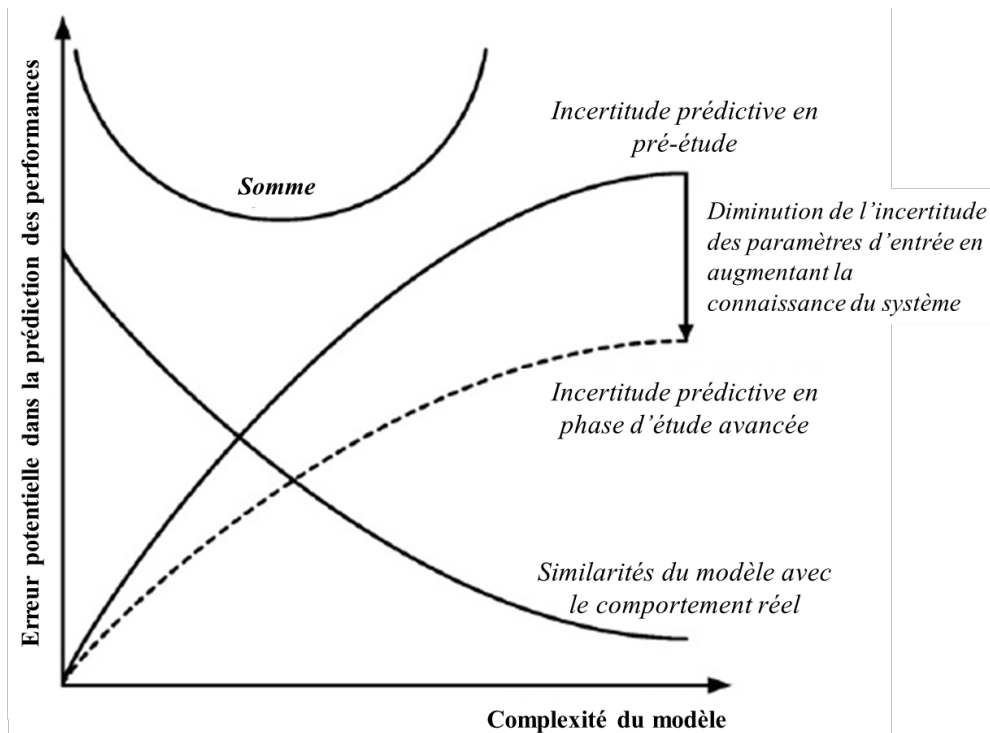


Figure II.5 : Incertitudes du modèles fonction de sa complexité selon la phase d'étude. Source : auteur à partir de Trčka et al. [202].

II.3.3.3. Approches analytiques et de modélisation

II.3.3.3.a. Approches de modélisation

Les outils de modélisation énergétique peuvent d'abord être différenciés en fonction de leur objectif et de leur approche de modélisation. Les approches de modélisation énergétique peuvent être distinguées entre scénarios, opération et planification [194,203] :

- les approches par **scénarios** sont utilisées pour déterminer une gamme de situations futures souhaitées en fonction d'un objectif donné (e.g. réduire les émissions de GES) ;
- les approches par **opération** déterminent la faisabilité technique (et potentiellement économique, sociale ou environnementale) de ces scénarios ; et
- les approches par **planification** prennent en compte les évolutions à long terme, notamment pour les décisions d'investissement.

Une quatrième approche à part entière consiste en l'analyse détaillée des systèmes électriques, considérant notamment les flux de puissance ainsi que la stabilité dynamique.

II.3.3.3.b. Approches analytiques

La variété des outils de modélisation énergétique entraîne une diversité d'approches analytiques, qui peuvent être différenciées entre les modèles de simulation et les modèles d'optimisation, même si d'autres approches comme les modèles d'équilibre [32,203] et les scénarios qualitatifs [204] existent. Ces approches peuvent être mobilisées pour résoudre des problèmes que l'on peut distinguer entre [137]:

- les *problèmes directs* où il s'agit de déterminer les performances d'un système énergétique pour des caractéristiques données, et

- les *problèmes inverses*, où il s'agit de déterminer les caractéristiques d'un système pour des performances exigées.

En laissant de côté les approches macroéconomiques et qualitatives, nous nous concentrons ici sur les modèles de simulation et d'optimisation. Les modèles de simulation sont souvent utilisés pour approcher le comportement et l'évolution réels d'un système physique [43], où le fonctionnement du système est imposé par un ensemble donné de paramètres. Les modèles de simulation sont assez courants, avec par exemple la simulation thermique dynamique utilisée pour la modélisation énergétique des bâtiments [205,206] et de quartier avec l'utilisation d'outils tels que Citysim [207] ou DIMOSIM [208] (tous deux propriétaires).

Les modèles d'**optimisation** décrivent quant à eux le système sans définir a priori la causalité du calcul. Les équations ne sont pas orientées, c'est-à-dire que les variables peuvent être des entrées ou des sorties du modèle selon les besoins. Ainsi les équations peuvent être inversées numériquement grâce à un algorithme d'optimisation par l'application de contraintes d'égalité et/ou d'inégalité sur des grandeurs calculées (e.g. consommation énergétique), ainsi qu'une fonction objectif donnée à minimiser. L'objectif est de déterminer le fonctionnement et/ou le dimensionnement d'un système énergétique pour lequel une multitude de scénarios sont explorés. Diverses méthodes d'optimisation peuvent être utilisées comme les méthodes heuristiques avec des algorithmes génétiques et l'optimisation par essais de particules, l'optimisation stochastique et l'optimisation distribuée pour le problème du consensus en utilisant la théorie des jeux. Des méthodes de programmation non linéaire (NLP) exploitant le gradient sont également utilisés pour leur propriété de convergence rapide et une meilleure prise en compte des contraintes. Enfin, les programmations linéaire (LP) et quadratique peuvent être utilisées si la nature du modèle le permet, ainsi que la programmation linéaire mixte en nombre d'entiers (MILP pour *Mixed Integer Linear Programming*) [209,210]. LP et MILP sont utilisés dans une variété de cadres. Parmi les exemples respectifs, citons URBS [211] pour LP; et OSeMOSYS [212] ou Energy Scope TD [195] pour MILP.

La **simulation** est par nature basée sur la définition de scénarios d'étude. Cela implique des négociations potentiellement longues entre les différentes solutions étudiées et une dépendance à des instructions de gestion déterminées a priori sans aucun degré de liberté. La simulation oblige souvent à une résolution par essais et erreurs répétés [213], alors que l'optimisation permet d'explorer un large éventail de variables de décision en même temps lorsque le cadre de négociation est formalisé par les spécifications du problème à résoudre.. L'optimisation semble donc plus adaptée à la recherche d'objectifs au sein de systèmes complexes [195,214], notamment dans les premières phases de conception où de nombreux scénarios étudiés sont encore possibles. Une attention particulière doit être accordée à la garantie d'un processus démocratique : Lund et al. [34] soulignent que l'optimisation risque d'imposer une solution d'expert.

II.3.3.4. *Échelles et résolutions temporelles et spatiales*

II.3.3.4.a. *Échelle géographique*

La plupart des outils de modélisation énergétique existants se concentrent sur l'étude de systèmes énergétiques à grande échelle [130], avec des outils ouverts tels que Balmorel [215],

TIMES [216,217] et PyPSA [218]. À ces échelles régionales ou continentales, les paramètres techniques sont souvent agrégés et ne représentent pas les composants spécifiques [32]. Les systèmes énergétiques à l'échelle du quartier posent quant à eux de nouveaux défis avec le développement de sources d'énergie locales, la stabilité des systèmes énergétiques et les stratégies de flexibilité tant du côté de la production que de la demande [193]. Des outils propriétaires tels que Reopt [219] ou Artelys Crystal Energy Planner [220], ou ouverts avec oemof [105], ficus [221], et rivus [222] offrent des possibilités d'optimisation à l'échelle locale.

II.3.3.4.b. *Horizon et résolution temporels*

Dans le contexte de la transition énergétique, il est également essentiel de saisir la dynamique réelle du système modélisé [32]. Des résolutions temporelles élevées permettent de prendre en compte les sources d'énergie renouvelables ainsi que la variabilité de la charge. De larges horizons temporels sont par ailleurs nécessaires pour inclure les variabilités quotidiennes et saisonnières. Ces précisions temporelles sont particulièrement importantes pour les stratégies de stockage et de flexibilité. Cependant, un compromis doit être trouvé entre une grande précision temporelle et un temps de calcul acceptable. Des techniques de réduction de période issues d'approches heuristiques, d'approches itératives et d'algorithmes de regroupement [223] ou encore de formulations par cycles [224] peuvent être utilisées afin de respecter ce compromis. La résolution temporelle et l'horizon dépendent également de l'approche de modélisation : alors que la prise en compte d'une seule année peut être suffisante pour l'analyse opérationnelle, des perspectives pluriannuelles seront nécessaires pour les approches de planification [225].

II.3.3.5. *Vecteurs énergétiques*

Traditionnellement, les modèles énergétiques ne représentent qu'un seul vecteur énergétique, notamment les systèmes électriques [130], sans tenir compte du couplage des secteurs [195]. Cela reflète la situation actuelle des systèmes énergétiques qui fonctionnent selon une logique très sectorielle. Chaque vecteur énergétique est associé à une chaîne spécifique, avec ses propres réseaux et acteurs peu interconnectés. Or, l'intégration intersectorielle est considérée comme essentielle pour modéliser des systèmes énergétiques durables viables [226,227]. Les interactions intersectorielles créent des synergies qui peuvent offrir de nouvelles possibilités de flexibilité et de stockage par le biais de conversions entre secteurs (e.g. de l'électricité à la chaleur, on parle de *power to heat*). Au-delà des aspects multi-énergétiques, des questions de mobilité, d'alimentation et de gestion des déchets peuvent également être considérées. Si ces considérations systémiques sont importantes et doivent être traitées plus fréquemment, rappelons qu'un modèle est à mobiliser pour des objectifs et un contexte donné : il ne pourra pas intégrer toutes les facettes d'analyses [191].

II.3.3.6. *Utilisabilité et accessibilité aux publics*

Un des problèmes liés à la modélisation énergétique ouverte est la surcharge d'informations, identifiée par Cao et al [94] : la mise à disposition de tous les codes et données peut rendre les modèles très difficiles à **comprendre** et à **utiliser**. Rapprocher la sémantique des modèles de celle des acteurs de l'énergie est un moyen de rendre **accessible la compréhension** des outils de modélisation énergétique. Pour ce faire, le choix du niveau d'abstraction est essentiel. En effet, plus le niveau d'abstraction est élevé, plus le modèle énergétique sera facile à formaliser

pour un développeur de modèle, et à comprendre pour quelqu'un qui récupérerait son travail. On peut alors distinguer différents niveaux :

- Le niveau d'abstraction le plus bas consiste en une séquence binaire, pas compréhensible pour les acteurs humains.
- Les niveaux d'abstraction bas, se rapprochent de la logique de programmation des micro-processeurs, par langage dit « machine » permettant aux ordinateurs d'exécuter des instructions élémentaires.
- Les langages de programmation (e.g. C, Java, Python, R, etc.) permettent aux acteurs humains d'écrire du code source pour un besoin donné, moyennant une connaissance du langage [1].
- Un langage de plus haut niveau pourra consister à se rapprocher de la physique du système avec des équations énergétiques, et donc une abstraction forte par rapport au langage machine.
- Enfin l'assemblage de modèles à partir de ces équations, suivant les principes de l'architecture dirigée par les modèles (MDA pour *Model Driven Architecture*) pourra rendre la modélisation compréhensible pour un plus grand nombre d'acteurs, notamment dans le cas de systèmes complexes [228]. L'appuyer par l'utilisation de langage naturel ou de représentations graphiques (e.g. Modelica [229]) rendra les modèles d'autant plus accessibles et facilitera leur utilisation [105]. L'assemblage en modèles simplifie en outre la formulation et permet la capitalisation des modèles utilisés.

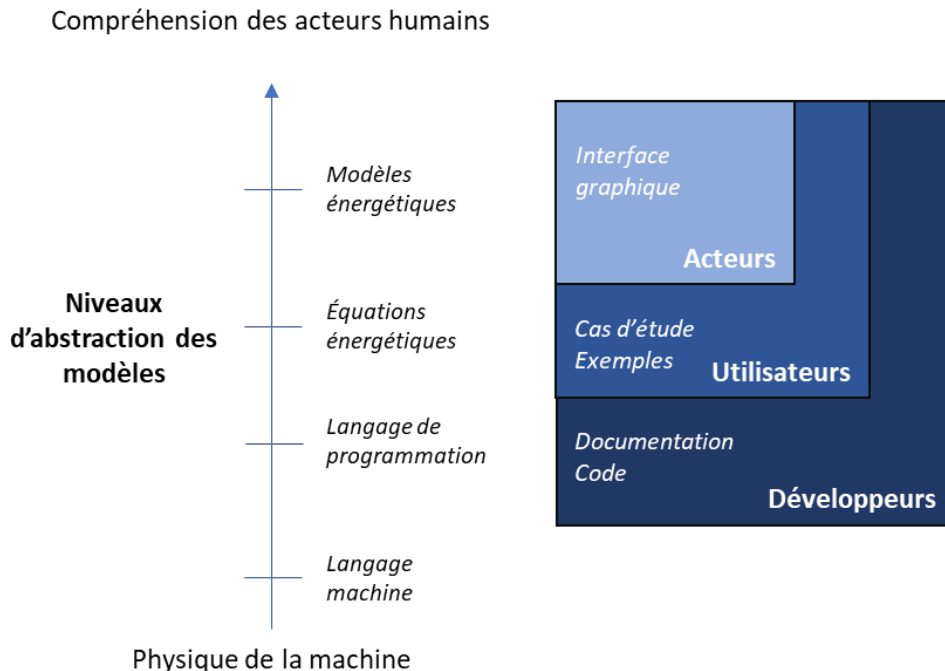


Figure II.6 : Niveaux d'abstraction et de sémantique de modèles énergétiques par rapport à la compréhension des acteurs humains. Source : auteur.

La Figure II.6 illustre ces niveaux d'abstraction et leur accessibilité pour les différentes parties prenantes. Nous distinguons ici trois types de parties prenantes :

- l'acteur qui participe à la conception du système énergétique,
- l'utilisateur de l'outil de modélisation énergétique qui le mobilise sur des cas d'étude, et
- le développeur de l'outil qui développe le notamment le code et la documentation des modèles.

Une partie prenante peut cumuler plusieurs rôles, les développeurs étant bien souvent utilisateurs [114] dans la communauté scientifique. En outre les développeurs peuvent se distinguer entre développeurs de l'outil, de modèles, ou de cas d'étude (voir la section II.3.3.1).

La propension des acteurs à devenir utilisateurs, et utilisateurs à devenir développeurs va notamment dépendre de l'accessibilité et de la convivialité de l'outil de modélisation énergétique. On notera que plus le niveau sémantique de la formulation est élevé, plus les transcriptions seront nécessaires pour présenter le problème à la machine solveur. De plus, la facilitation de la formalisation peut conduire à une compréhension biaisée de la modélisation par l'utilisateur, qui ne sera pas nécessairement au courant du contenu des modèles, particulièrement dans les couches de sémantique basses et proches des langages machines (ce qui peut poser des problèmes de déverminage dans la formulation des modèles et la configuration des outils lorsque ceux-ci ne convergent pas).

L'**utilisabilité**, i.e. la capacité de l'outil à être compris, appris, utilisé et attractif pour l'utilisateur dans des conditions données, est également une caractéristique essentielle des outils de modélisation énergétique [114]. Elle peut par exemple s'incarner à travers des interfaces graphiques [130,194,230] (e.g. le projet en cours de développement open-plan¹³, basé sur l'outil oemof [105]), qui permettent de disposer d'une représentation graphique perceptible des modèles, et de faciliter l'assemblage de modèles, notamment pour les utilisateurs non-développeurs. L'utilisabilité ne doit toutefois pas être réduite à cela et est à adapter en fonction des usages [231]. Des pratiques courantes comme la documentation à associer au code source ouvert et versionné aide à comprendre l'outil, de même que les tutoriels et les exemples pour débutants. Hülk et al. [171] proposent également des fiches synthétiques (*fact sheets*) pour présenter les outils, les modèles et les scénarios de manière claire, concise et compréhensible. La faible utilisabilité des outils de modélisation énergétique ouverts apparaît comme une des barrières principales à la migration depuis des solutions commerciales [114], mais l'utilisabilité reste souvent négligée dans la conception des outils [232]. Ferrari et al. identifient notamment six outils conviviaux, dont trois sont gratuits et aucun n'est open-source [230]. Berendes et al. insistent sur ce manque et proposent une méthode d'évaluation et de comparaison de l'utilisabilité des outils de modélisation énergétique ouverts [114].

II.3.3.7. *La considération des aspects sociaux*

Inclure des aspects sociaux dans les outils de modélisation énergétique a également été identifié comme l'un des défis actuels du domaine [204], même si de plus en plus de modèles sociotechniques sont développés [32]. D'une part, les aspects sociaux peuvent être pris en compte par la **modélisation des questions sociales**, comme le propose la boîte à outils

¹³ <https://open-plan.rl-institut.de/en/>

QTDIAN du projet européen SENTINEL [233]. D'autre part, ils peuvent être intégrés par **l'implication des parties prenantes** dans le processus de conception, se rapprochant de processus de recherche participative, i.e. via des collaborations profondes, itératives et renseignées éthiquement, notamment avec des acteurs non-académiques qui sont rarement impliqués [190]. Certains auteurs soutiennent que cette participation est nécessaire, compte tenu de l'impact de la conception des systèmes énergétiques sur la société [34,107]. Une telle participation pourrait améliorer la pertinence et la légitimité des modèles [32], mais aussi leur utilisabilité [232]. Robbie Morrison défend par exemple l'idée d'une communauté ouverte d'analyse des systèmes [88], comprenant d'une part des organisations de la société civile et des autorités publiques afin de sélectionner des visions du futur par le biais de spécifications de scénarios énergétiques, et d'autre part une communauté de modélisation énergétique ouverte pour fournir des outils et un support pour les processus de modélisation. Les conclusions du projet SENTINEL vont également dans ce sens, encourageant le développement de modèles énergétiques systémiques et transparents, au service des décisions politiques et avec une implication des parties prenantes dans le développement et l'usage [234].

La modélisation des aspects sociaux tels que les contraintes politiques [101] ou les objectifs des parties prenantes et leur domaine de responsabilité peut faciliter les phases de négociation dans un processus de conception multi-acteurs [235]. Étant donné que la modélisation énergétique et l'élaboration des politiques s'influencent mutuellement, des modèles et des pratiques à la fois transparents et transdisciplinaires apparaissent comme nécessaires pour développer des outils communs et utiles pour la société [236]. Comme le soulignent Süsser et al., une attention doit être portée pour que l'implication des utilisateurs et les améliorations des modèles ne rendent pas ces derniers trop complexes : les améliorations doivent correspondre aux besoins réels des utilisateurs [190].

Un bilan des différentes caractéristiques introduites dans cette section est présenté dans la Figure II.7.

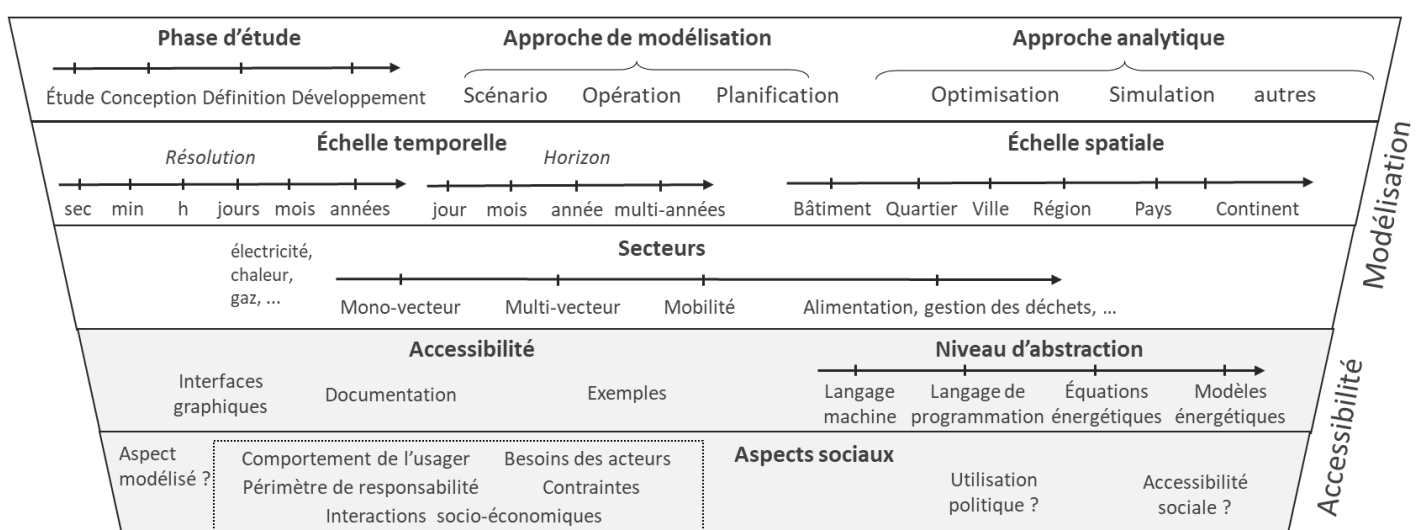


Figure II.7 : Bilan des caractéristiques des outils de modélisation énergétique. Source : auteur.

II.3.3.8. Modélisation énergétique ouverte à l'échelle du composant ?

Les échelles des matériaux, composants et assemblages, inférieures aux échelles spatiales du bâtiment ou des systèmes de type micro-réseaux, n'ont pas été abordées jusqu'ici. Il s'agit typiquement des systèmes de production comme les panneaux solaires, les systèmes de stockage comme les batteries, les systèmes de consommation et les convertisseurs d'énergie comme les moteurs ou les composants électroniques. La modélisation énergétique ouverte s'y incarne différemment dans ses caractéristiques. Bien sûr au niveau des échelles spatiales, mais aussi temporelles : la conception à ces échelles mobilisera souvent des résolutions inférieures à la seconde, pour prendre en compte les phénomènes transitoires (notamment en génie électrique où les fréquences sont élevées). Les approches analytiques par problème direct ou inverse y sont bien adaptées [237]. Les modèles seront mono ou multiphysiques pour prendre en compte différents vecteurs énergétiques, et certains aspects économiques, environnementaux et sociaux pourront y être modélisés (e.g. les usagers peuvent typiquement être considérés via des personas et scénarios [238]) (Figure II.8).

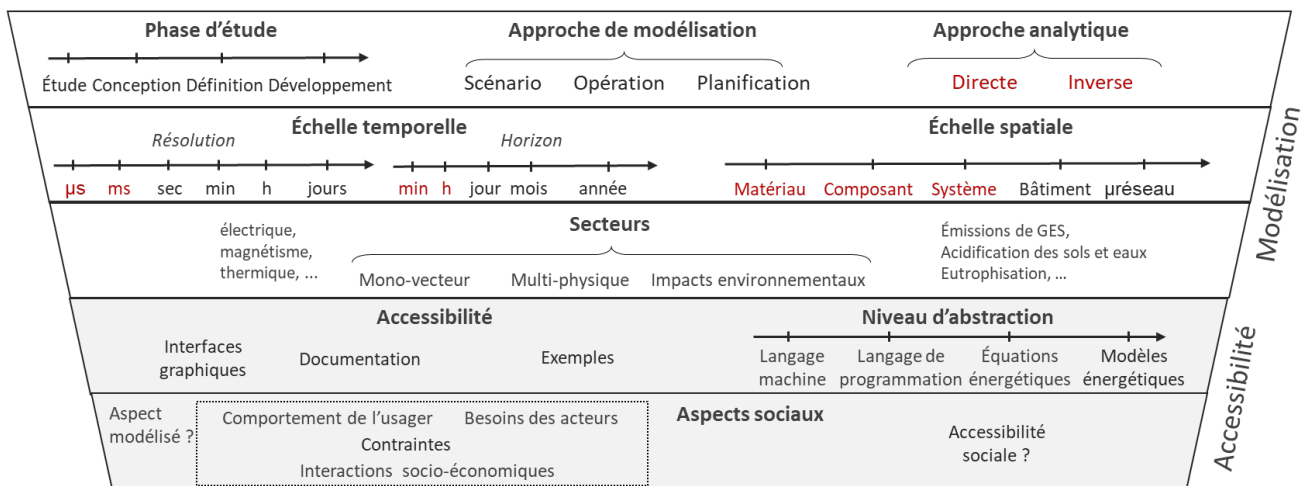


Figure II.8 : Bilan des caractéristiques des outils de modélisation énergétique pour la conception d'objets technologiques (différences avec la figure précédente en rouge). Source : auteur

Les pratiques de modélisation énergétique ouverte peuvent et doivent aussi se diffuser à ces niveaux, car les avantages de l'ouverture restent valables quelle que soit l'échelle de conception. Des **exemples de pratiques de modélisation énergétique ouverte aux échelles composants** s'incarnent au travers d'outils tels que openAFPM et WindSys [239] développés par le *Rural Electrification Research Group* à Athènes pour la conception d'éoliennes auto-construites durables [166] ; ou encore Pylecan développé par l'entreprise Eomys à Lille pour la conception multiphysique de machines électriques [133]. Au G2Elab, c'est l'outil NoLOAD qui a été développé aussi bien pour le dimensionnement de composants électriques (e.g. transformateur, alternateur à griffe, convertisseurs d'électronique de puissance, ...) [240], que pour la modélisation énergétique à l'échelle bâtiment [241]. La modélisation à ces échelles implique souvent de faire appel à des méthodes d'optimisation et de simulation capables de traiter des phénomènes non-linéaires.

La modélisation énergétique aux échelles territoriales peut toucher le citoyen et utilisateur final dans ses aspects politiques avec les scénarios de planification, et de développement des

énergies renouvelables par définition distribuées. Concernant la conception de composants, le lien aux citoyens est souvent plus éloigné, mais peut s'incarner par le lien entre objet numérique et matériel. En effet, contrairement aux modélisations territoriales, les phases d'étude de conception de composants peuvent amener jusqu'à la conception matérielle du composant, reliant ainsi la modélisation énergétique ouverte aux pratiques d'*open hardware*. Kostakis et al. [159] décrivent un modèle de production en résultant : conception globale, fabrication locale (*design global, manufacture local*) où la conception est partagée via des Communs numériques de connaissance, et la fabrication est réalisée localement en fonction des ressources à disposition : on se rapproche avec cette vision du courant Low-Tech. (section I.3.3)

Après la description des caractéristiques des outils de modélisation énergétique ouverte, nous présentons dans la section suivante un exemple de développement d'un tel outil à l'échelle quartier à partir de notre expérience.

II.3.4. Développement d'un outil de modélisation énergétique ouverte : l'exemple de OMEGAAlpes.

II.3.4.1. *Historique et développement ouvert*

Nous proposons d'illustrer la stratégie de développement d'un outil de modélisation énergétique ouverte avec une approche réflexive sur l'expérience de développement de l'outil OMEGAAlpes. Le développement de cet outil a débuté en 2015 sous l'impulsion de Vincent Reinbold [242], et a ensuite été repris, notamment dans des travaux de thèse par Camille Pajot [243] qui posera réellement les briques de l'outil, notamment appliqué aux enjeux de flexibilité énergétique à l'échelle quartier. Puis Lou Morriet [122] développera en partenariat avec le laboratoire de sciences sociales de Grenoble PACTE, tout une bibliothèque autour des acteurs et notamment leur périmètre de responsabilité. Également Mathieu Brugeron ayant utilisé l'outil sur un applicatif de contrôleurs prédictifs optimisés [244], et moi-même sur le développement d'une bibliothèque de cas d'étude (qui sera notamment traitée dans les chapitres suivants).

Le choix de l'**open-source** a été réalisé dès cette reprise des travaux, avec une idée d'accessibilité et de maximisation du potentiel de collaboration. C'est donc une licence permissive, Apache 2.0 [245], qui a été sélectionnée pour permettre des collaborations, y compris avec des acteurs ayant opté pour une stratégie de développement propriétaire. L'outil est versionné en ligne depuis 2018, avec des exemples d'utilisation et notebooks sur la forge logicielle Gitlab [A]¹⁴, et archivé sur Software Heritage [B]. Sa documentation est disponible en ligne [246]. OMEGAAlpes laisse le choix du solveur à l'utilisateur par le biais du package PuLP [247] : l'utilisation de solveurs open-source ne limite pas l'accessibilité aux professionnels ou aux utilisateurs académiques [32], tandis que la possibilité d'utiliser des solveurs propriétaires peut grandement améliorer les performances de l'outil, les solveurs open-source

¹⁴ Se rapporter à la section Matériel supplémentaire

étant souvent moins performants que les solveurs commerciaux [248]. Une *fact sheet* présentant OMEGAAlpes est disponible dans la bibliothèque de l'Open Energy Platform [249].

II.3.4.2. *Caractéristiques de OMEGAAlpes* *POURQUOI ?*

Le développement de l'outil OMEGAAlpes répond à différents **objectifs** [243], qui feront appel à des fonctionnalités spécifiques :

- simplicité et rapidité d'utilisation,
- multi-énergie,
- générique (i.e. capable de traiter des cas d'étude variés),
- extensible et réutilisable,
- compatible avec une formulation MILP (*Mixed Integer Linear Programming*).

QUAND ?

Il est principalement destiné aux **phases d'étude préliminaires**.

QUOI ?

OMEGAAlpes est un **générateur de problèmes d'optimisation MILP**, utilisant des modèles macroscopiques. Ce choix a été fait pour éviter d'augmenter le potentiel d'incertitude avec des modèles détaillés [202], tout en gérant la variété des solutions possibles due au grand nombre de degrés de liberté en phase de pré-étude. L'optimisation MILP présente plusieurs intérêts par rapport aux autres méthodes. Tout d'abord, la linéarité de la formulation permet de gérer le grand nombre de variables d'optimisation des phases de pré-étude, en particulier à haute résolution temporelle. De plus, de nombreux systèmes, tels que les stockages, présentent des états finis que les binaires permettent de mieux exprimer par rapport à la programmation linéaire (LP) [130,193]. L'optimisation MILP peut conduire à l'optimum global plus rapidement que d'autres méthodes pour des problèmes d'optimisation énergétique [43,210]. Cependant, cette méthode peut nécessiter un prétraitement des modèles comme une linéarisation par morceaux en fonction de la représentation du système [250].

Peu d'outils de modélisation énergétique ouverte sont consacrés à des échelles géographiques réduites ; OMEGAAlpes explore en effet les systèmes énergétiques à **l'échelle des bâtiments et des quartiers**. Les pas de temps sont généralement des heures mais peuvent être ajustés de minutes à jours. L'horizon temporel peut être ajusté de quelques jours à plusieurs années. Différents vecteurs énergétiques sont considérés, les deux principalement utilisés étant l'électricité et la chaleur.

OMEGAAlpes est développé en **Python** pour profiter d'un langage de script moderne disponible et utilisable gratuitement. Python inclue des capacités orientées objet ainsi qu'une large gamme de fonctions largement utilisées dans la modélisation énergétique [43]. Il facilite également l'identification, l'extraction et l'utilisation externe des modèles [87]. Le développement comprend de bonnes pratiques telles que des tests unitaires et d'intégration. La **sémantique** d'OMEGAAlpes est pensée pour être proche de celle des acteurs de l'énergie,

avec des unités énergétiques préconstruites (e.g. stockage, consommation), comprenant des contraintes et objectifs opérationnels. Ces unités ont été développées pour explorer des questions de recherche, mais aussi en collaboration avec les parties prenantes sur des projets concrets. Elles sont continuellement améliorées et complétées. L'assemblage du modèle est alors simplifié pour la phase importante qu'est la formulation [39,122], puisque le modélisateur peut utiliser des briques préconstruites au lieu de développer l'ensemble du système, tout en capitalisant ou réutilisant les formulations des études. Une représentation graphique est associée aux unités énergétiques et a permis de développer la première version d'une interface graphique permettant aux utilisateurs de générer directement un script OMEGAAlpes (Figure II.9). En plus de sa documentation en ligne, OMEGAAlpes fournit une bibliothèque de cas d'étude et des Jupyter Notebooks (voir la section II.4.2) pour appréhender facilement les principes de modélisation et les fonctionnalités de l'outil.

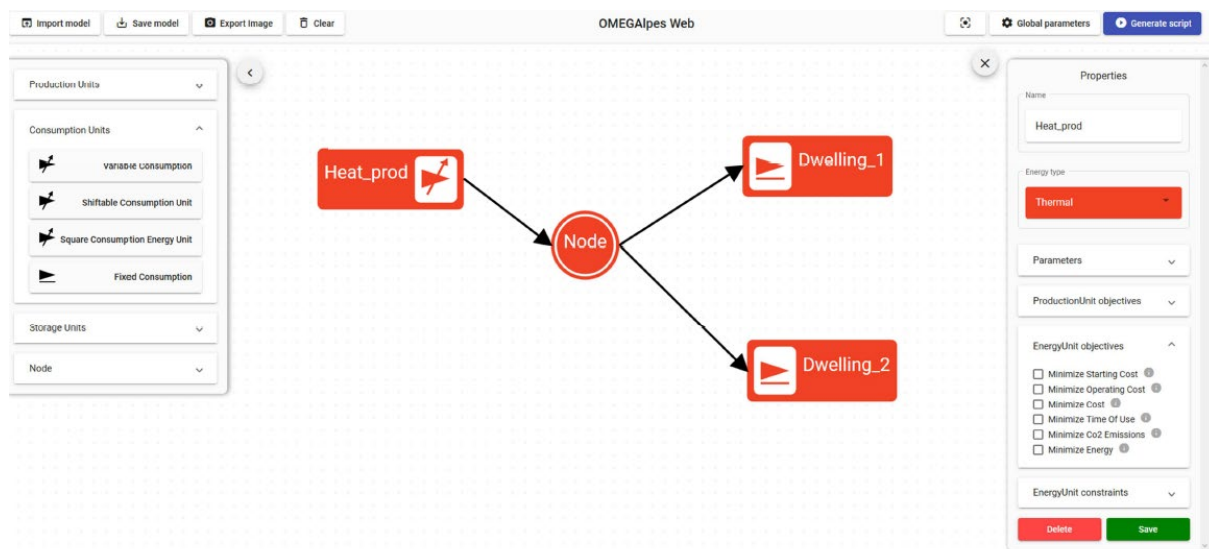


Figure II.9 : Capture d'écran de l'interface graphique OMEGAAlpes. Source : auteur.

OMEGAAlpes permet en outre de modéliser les **objectifs, les contraintes et le périmètre de responsabilité des acteurs** de l'énergie. Les modèles énergétiques et d'acteurs peuvent être rapidement adaptés aux besoins des parties prenantes [122]. Ceci, en plus de son ouverture et de son niveau d'abstraction, rend ses modèles pertinents pour le soutien aux négociations. Actuellement, OMEGAAlpes est indirectement **utilisé pour le soutien aux politiques** au sens de Chang et al [32] : les modèles sont utilisés pour la négociation et le conseil dans un projet de récupération de chaleur fatale avec un laboratoire local impliqué dans la modélisation, ainsi que l'autorité publique locale et l'opérateur du réseau de chaleur urbain. L'Agence française pour la transition écologique (ADEME) a également financé un projet articulé autour de l'outil OMEGAAlpes, ses méthodes et ses cas d'utilisation [251].

Les différentes caractéristiques de OMEGAAlpes sont présentées en bleu dans la Figure II.10.

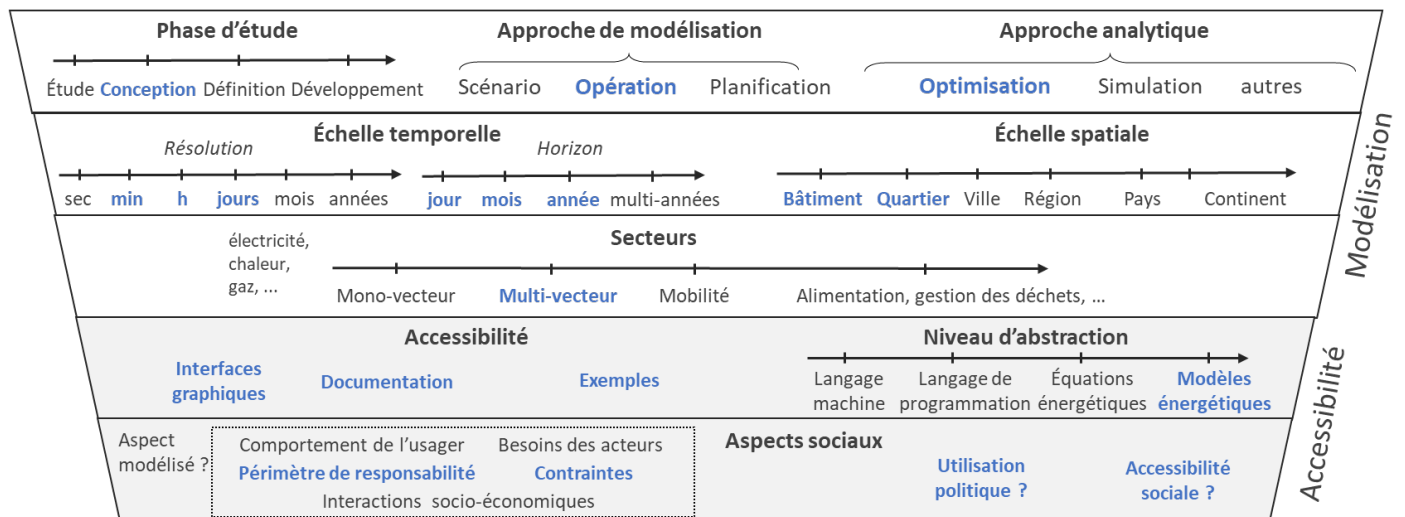


Figure II.10 : Caractéristiques de l'outil de modélisation énergétique OMEGAlpes (bleu gras).
Source : auteur.

QUI & COMMENT ?

Cela a été évoqué, OMEGAlpes a été développé avec la licence permissive Apache 2.0 pour maximiser les possibilités de collaborations. Concernant les publics visés dans le cadre du développement de l'outil, l'idée était de promouvoir les spécificités de OMEGAlpes (e.g. modélisation des acteurs, interface graphique, génération de modèles) auprès des développeurs d'outils. Les utilisateurs de modèles et acteurs de l'énergie sont également des cibles par la présentation de cas d'étude ouverts traités avec l'outil.

Un développement collaboratif est organisé sur Gitlab 0 avec une équipe de développeurs rassemblant chercheurs, doctorants, stagiaires et étudiants de différents laboratoires et cursus : principalement le G2Elab mais aussi le LOCIE (génie thermique) [252–255], PACTE (sciences humaines et sociales) [122,235], ainsi que le CSTB (génie du bâtiment) [244] et le master MIAGE (développement informatique).

Le logiciel est utilisé par des chercheurs, doctorants, stagiaires et étudiants des laboratoires G2Elab et LOCIE. Il est également suivi par l'ADEME dans le cadre du projet RETHINE. Il est utilisé dans un projet de gestion énergétique local dans le quartier de la Presqu'Île de Grenoble avec le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, le CEA Liten, la compagnie de chauffage de Grenoble (CCIAG) ainsi que Grenoble Alpes Métropole. Il a également été utilisé avec une compagnie artistique (Organic Orchestra) pour dimensionner leur système énergétique. Le logiciel est mobilisé sur des applicatifs d'autoconsommation par l'entreprise Enogrid, et de gestion énergétique par modèle prédictif par le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment). La Figure II.11 présente une cartographie des utilisateurs principaux de OMEGAlpes. Les développeurs de modèles et cas d'étude y ont été positionnés en tant qu'utilisateurs.

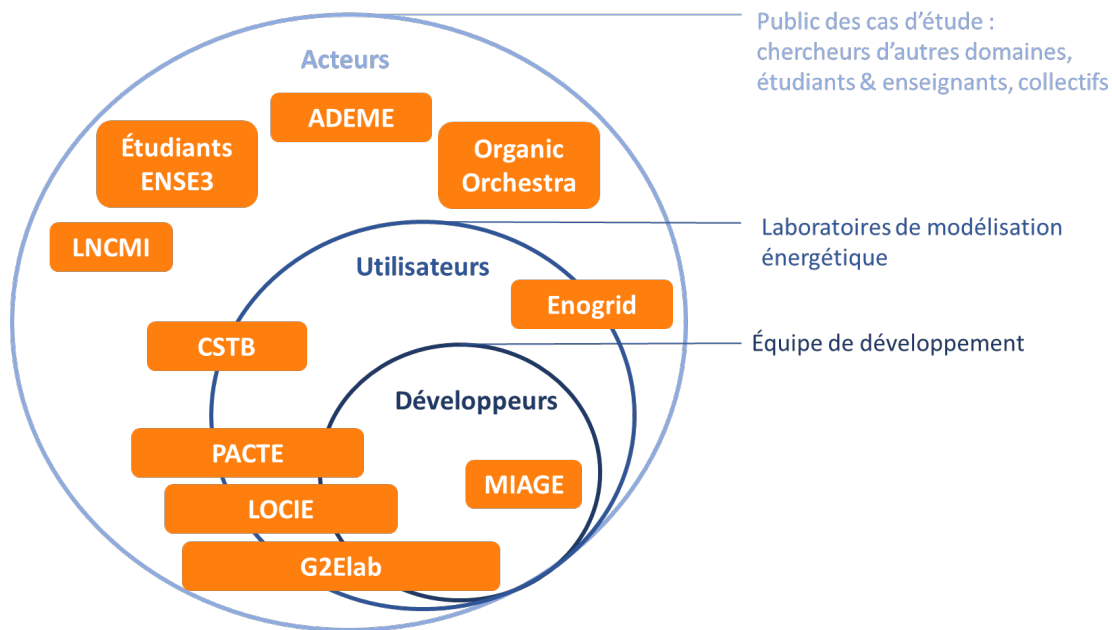


Figure II.11 : Développeurs, utilisateurs et acteurs autour de l'outil OMEGAlpes. Source : auteur.

II.3.4.3. Positionnement par rapport à l'existant

Compte tenu des caractéristiques retenues pour OMEGAlpes, plusieurs outils de modélisation énergétique apparaissent comme pertinents pour les pré-études. OSeMOSYS [212] et Energy Scope TD [195] sont des outils de modélisation open-source utilisant l'optimisation MILP et intégrant le couplage sectoriel, mais ils se concentrent respectivement sur les projets à long terme à grande échelle, et les systèmes à l'échelle nationale. A l'échelle du quartier, oemof [105], ficus [221], rivus [222] et Calliope [256] peuvent être utilisés. Rivus est bien adapté à l'optimisation des coûts des réseaux de distribution, tandis que ficus est développé pour la planification d'expansion de capacité, et la gestion du système d'approvisionnement énergétique distribué d'une usine. Oemof et sa bibliothèque interne solph, de même que Calliope, offrent quant à eux des générateurs de modèles.

Ficus, rivus et oemof utilisent la licence copyleft GNU-GPL 3.0, tandis que OSeMOSYS, Calliope et Energy Scope sont développés avec la licence permissive Apache 2.0.

Parmi ces outils, certains disposent de caractéristiques et d'une interface graphique conviviales, mais aucun n'intégrait tous nos besoins dans la modélisation au moment du développement de OMEGAlpes : l'assemblage des différentes fonctionnalités recherchées, mais aussi des fonctionnalités spécifiques comme la modélisation du périmètre de responsabilité des acteurs pour les phases de négociations [122].

Des comparaisons à d'autres outils ont été réalisées : en interne avec la grille de lecture de Groissböck sur les fonctionnalités d'outils de modélisation énergétique [43], et par d'autres auteurs tels que Heider et al. [257] concernant les capacités de modélisation de flexibilité énergétique. Dans ces deux classements, OMEGAlpes se positionne dans la moyenne des outils existants, avec respectivement une position en 14^{ème} sur 29, et 19^{ème} sur 24. En outre, il obtient les niveaux maximaux en termes de Citation, Utilisation et Recherche de la procédure

CDUR [113] (Annexe 7). Un positionnement intéressant consisterait en l'application de la méthode récente de Berendes et al. [114] pour qualifier l'utilisabilité d'un outil.

II.3.4.4. Retour d'expérience de développement

Le développement de OMEGAlpes a permis à l'équipe de monter en compétence sur :

- le développement d'un méta modelleur open source MILP pour systèmes énergétiques :
 - o connaissance sur l'état de l'art, les solveurs disponibles,
 - o mise en place d'une stratégie de modélisation,
 - o développement d'un formalisme,
 - o modélisation de cas d'études concrets,
 - o partage d'expérience et échanges avec d'autres disciplines.
- Le déploiement d'un projet open-source :
 - o compréhension des licences pour le code et les données,
 - o déploiement sur un espace de forge logicielle Gitlab, co-développement et prise en main de git.

Aussi, le travail d'état de l'art présenté dans la sous-section précédente a été réalisé en parallèle du développement de OMEGAlpes, et non en amont pour choisir entre développement propre et contribution. Le développement d'un outil propre a permis de tirer de nombreuses leçons et d'acquérir une visibilité auprès d'autres laboratoires et d'instances telles que l'ADEME dans le cadre du projet RETHINE au sein du projet Eco-SESA [251]. Toutefois la stratégie de développement de fonctionnalités spécifiques et de cas d'étude sans viser le développement d'un outil de référence, et la différence de moyens humains face à des équipes de développements d'outils comme oemof ou OSeMOSYS qui rassemblent de vastes équipes de dizaines de développeurs, laissent ouverte la possibilité de la contribution à d'autres outils de référence, sur la base des fonctionnalités spécifiques de OMEGAlpes et de l'état de l'art réalisé.

Comme on l'a évoqué concernant la stratégie de diffusion de OMEGAlpes, l'équipe se concentre surtout sur le développement de cas d'études et de modèles associés. Ce choix provient du constat que, si les outils peuvent faciliter et catalyser les processus de modélisation, seuls ils ne permettent pas de faire percevoir leurs intérêts et applicatifs pour les acteurs de l'énergie. Les outils s'inscrivent en effet dans un processus qui lie les pratiques, de l'open data à l'open access, **incarnés par des cas d'étude**. Ces cas d'études, plus compréhensibles, apparaissent comme de **véritables vecteurs de reproductibilité** pour les travaux de modélisation énergétique. Avant d'explorer ce constat dans le Chapitre III, la notion même de reproductibilité et ses incarnations doivent être discutées.

II.4. Reproductibilité des processus de modélisation énergétique ouverte

II.4.1. Reproductibilité des processus dans le milieu de l'énergie : cadrage

En 1995, Buckheit & Donoho [258] formulaient un slogan en s'appuyant sur les pensées du géophysicien Jon Claerbout sur la reproductibilité computationnelle :

« Un article sur un résultat de calcul est une annonce publicitaire, pas de la recherche. La véritable contribution à la recherche est l'environnement logiciel complet, le code et les données qui ont produit le résultat »

Plutôt qu'une sentence absolue, ce slogan avait pour vocation de développer une discipline dans le partage des contenus de recherche mobilisant des outils informatiques, et a trouvé des échos plus récents, par exemple avec Ince et al. qui préconisent la mise à disposition des codes et environnements en plus des articles et données de recherche [259].

Aussi, mettre à disposition les différentes étapes d'un processus de modélisation énergétique permet d'en favoriser la reproductibilité. Mais la signification même de reproductibilité et sa différenciation avec la répliquabilité ne sont toutefois pas arrêtées et dépendent des disciplines [260,261]. La modélisation énergétique n'étant pas à proprement parler une discipline, elle n'est a priori pas rattachée à une définition donnée [262] : aussi un travail de cadrage s'impose pour ce domaine. Barba [260] différencie trois groupes existants dans la littérature et les disciplines pour les définitions de répliquabilité et reproductibilité :

- A : ne font aucune distinction entre les mots,
- B1 : « les mêmes données et mêmes méthodes donnent les mêmes résultats » correspond à reproduire, « de nouvelles données et/ou nouvelles méthodes dans une étude indépendante donnent les mêmes résultats » correspond à répéter
- B2 : vice-versa, « les mêmes données et mêmes méthodes donnent les mêmes résultats » correspond à répéter, « de nouvelles données et/ou nouvelles méthodes dans une étude indépendante donnent les mêmes résultats » correspond à reproduire.

Goodman et al. [99] appellent quant à eux à une meilleure caractérisation de la reproductibilité dans les domaines scientifiques. Pour cela, ils proposent un nouveau lexique pour la reproductibilité de la recherche :

- *Reproductibilité des méthodes* : fournir suffisamment de détails sur les outils et les données pour que les mêmes procédures puissent être répétées à l'identique.
- *Reproductibilité des résultats* : obtenir les mêmes résultats dans une étude indépendante en ayant suivi les mêmes procédures.
- *Reproductibilité inférentielle* : tirer les mêmes conclusions à partir de la répliquabilité indépendante d'une étude, ou bien à partir d'une réanalyse de l'étude originale.

Ces définitions ont l'avantage de qualifier explicitement le terme reproductibilité [261], là où le sens de répliquabilité, répétabilité et reproductibilité est quasi-identique dans le langage courant, et implicite selon la discipline [263] voire l'interlocuteur.

Dans le milieu de la modélisation énergétique, les auteurs mentionnant la reproductibilité semblent appartenir aux différents groupes A [93], B1 [84] et B2 [171,262] distingués par Barba. Cela souligne la difficulté de la définition de la reproductibilité dans le domaine. En se basant sur la littérature, le Tableau 4 a été construit pour le travail de cadrage de cette section. Il présente une description et des illustrations des reproductibilités de Goodman et al. pour le domaine de la modélisation énergétique.

Reproductibilité	Description	Illustration
<i>Des méthodes</i>	Fournir les données et modèles énergétiques avec leur version pour pouvoir répéter une étude à l'identique.	Mise à disposition des sources des données et du détail de la modélisation (mise en équation, hypothèses) dans un article, des matériels supplémentaires ou des métadonnées pour pouvoir répéter la procédure de modélisation à l'identique.
<i>Des résultats</i>	Obtenir les mêmes résultats à partir de la reconstruction d'un modèle énergétique avec le même ou un autre outil de modélisation.	Jupyter Notebook documenté avec les données d'entrée, le modèle utilisé et ses dépendances pour être capable de le relancer et obtenir les mêmes résultats, tout en gardant la possibilité de changer de modèle.
<i>Inférentielles</i>	Tirer les mêmes conclusions stratégique ou opérationnelle (dimensionnement, pilotage) en réanalysant le processus de modélisation énergétique original ou en en menant un nouveau.	Le processus de modélisation énergétique est mené à l'identique dans d'autres conditions (ensoleillement, mix énergétique, ...) et les conclusions tirées quant aux indicateurs énergétiques, économiques, environnementaux ou sociaux sont cohérentes entre les deux analyses.

Tableau 4 : *lexique de recherche reproductible de Goodman et al. [99] adapté au domaine de la modélisation énergétique. Source : auteur*

Un rapport de 2019 du *Comité sur la Reproductibilité et Réplicabilité en Science* [264] définit :

- La répliquabilité comme l'obtention de résultats cohérents entre des études visant à répondre à la même question scientifique, chacune d'entre elles ayant obtenu ses propres données. Cette définition se rapproche de la reproductibilité des résultats et de la reproductibilité inférentielle.
- La **reproductibilité** comme **l'obtention de résultats cohérents en utilisant les mêmes données d'entrée, les mêmes étapes, méthodes et codes de calcul, et les mêmes conditions d'analyse**. Cette définition se rapproche de la reproductibilité des résultats de Goodman.

Cette dernière définition de la reproductibilité est synonyme de définitions utilisées en informatique (i.e. la reproductibilité computationnelle [265,266]) : elle apparaît comme adaptée pour la modélisation énergétique, qui consiste principalement en une activité computationnelle à l'environnement standardisé au degrés de contrôle élevé [263]. C'est cette définition qui sera adoptée par la suite lorsque le terme reproductibilité est utilisé seul.

La section précédente s'achevait sur la notion de cas d'étude comme bons vecteurs de reproductibilité dans le domaine de la modélisation énergétique. Ces cas d'études peuvent trouver comme supports les notebooks, des objets de plus en plus souvent mobilisés en pratique dans les mondes académiques et socio-économiques. Les notebooks comme supports

de cas d'étude pour la modélisation énergétique seront au cœur du Chapitre III. Aussi, la section suivante détaille l'histoire, la définition, les usages et les limites de ces objets.

II.4.2. Les notebooks, des objets supports pour l'ouverture et la reproductibilité

II.4.2.1. De la programmation lettrée aux notebooks

Au début des années 1980, Donald Knuth propose le concept de programmation lettrée, qu'il résume en ces termes : « Au lieu d'imaginer que notre tâche principale consiste à indiquer quoi faire à un ordinateur, concentrons-nous plutôt sur l'explication de ce que nous voulons que l'ordinateur fasse auprès d'êtres humains » [267]. La programmation lettrée (*literate programming*) couple code et langage naturel (en plus des autres supports) : elle entremêle code et texte dans un document unique, pour en faciliter la lecture par les acteurs humains. C'est un nouveau paradigme qui permet de comprendre *pourquoi* un code a été développé, là où la documentation seule explique *comment* ce code fonctionne ou doit être utilisé [268]. La programmation lettrée prend forme à la fin des années 1980 avec des documents, les *computational notebooks* (que l'on nommera notebooks par la suite). Si les premières implémentations de notebooks restent des produits de niches, c'est le développement de solutions open-source qui en permettent un usage de plus en plus généralisé [269]. Ces solutions consistent en des environnements qui permettent d'exécuter des parties du notebook avec une visualisation immédiate des résultats et du texte formaté. Aujourd'hui Jupyter (initialement nommé IPython) est la plus populaire de ces solutions, même si de nombreux environnements existent pour les notebooks [270].

Concernant la sémantique utilisée, le terme *Jupyter Notebook* désigne à la fois le document et l'application qui l'exécute. On utilisera ici Jupyter pour désigner l'application, et notebook pour le document [271]. Par ailleurs nous faisons ici le choix d'employer le terme anglais notebook, proche de l'usage. Diverses terminologies peuvent toutefois être employées, de la traduction littérale (carnet computationnel) au néologisme (bloc-code) [272].

II.4.2.2. Définition et usages des notebooks

Les notebooks constituent des documents de programmation lettrée combinant code dans un langage de programmation textuel (e.g. Python, R ou plus récemment Julia), texte et résultats d'exécutions avec des visualisations et d'autres supports de médiation riches.

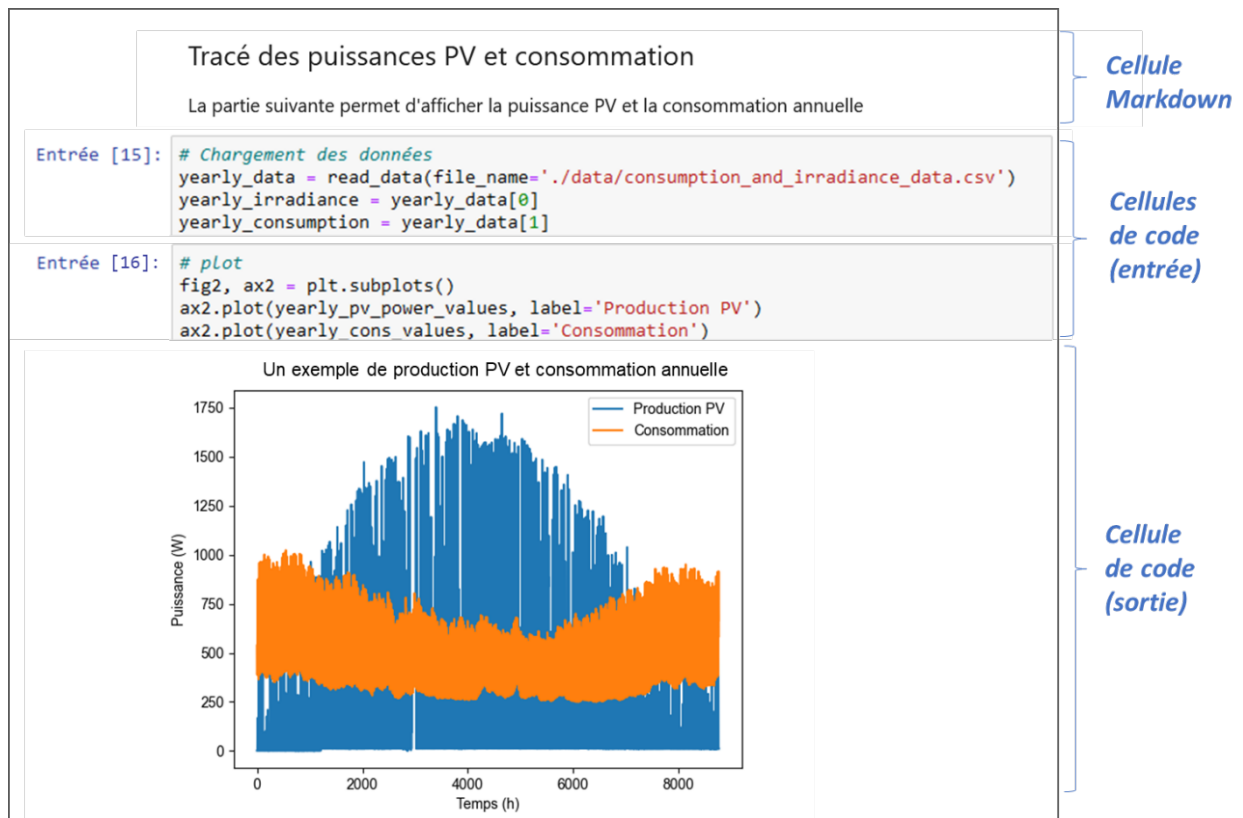


Figure II.12 : Illustration des différents types de cellules dans un notebook. Source : auteur.

Les notebooks sont composés de cellules, qui peuvent être de trois types, Markdown, code et brut [269,271] (Figure II.12) :

1. Une cellule Markdown contient du texte formaté selon le langage de balisage léger Markdown [273], compréhensible en texte brute tout en permettant un usage simplifié de fonctionnalités de mise en forme (format de texte, images, formules, etc.).
2. Une cellule de code contient du code exécutable utilisé pour produire des résultats, qui seront affichés directement en dessous. Sur la gauche, un compteur ([n°]) indique le numéro d'exécution de la cellule dans le notebook.
3. Une cellule brute contient du texte qui n'est ni du code, ni du texte formaté, utilisés pour de la configuration (e.g. convertir des cellules dans un autre format comme LaTeX). Ces dernières sont beaucoup moins employées et ne seront pas présentées ici.

Les notebooks permettent ainsi d'afficher et d'utiliser du code, mais aussi des données d'entrée et résultats sous formes numérique et graphique, voire même de mettre en place des interfaces utilisateurs (Figure II.13).

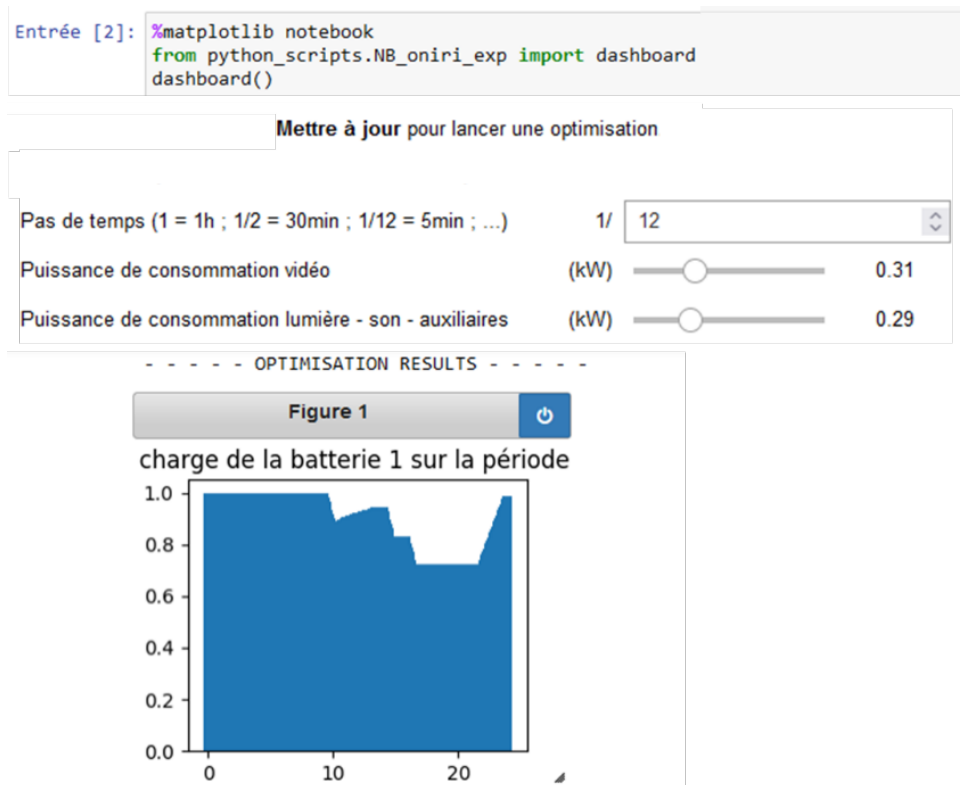


Figure II.13 : Exemple d'interface et cellule de résultat de notebook. Source : auteur [1].

Les notebooks sont utilisés aussi bien dans l'industrie que le milieu académique, notamment dans le domaine de la science des données [269]. Ils apparaissent comme des outils prometteurs pour une plus grande ouverture des sciences [274] : d'une part pour la documentation et le changement de paradigme que permet la programmation lettrée adoptée dans ces documents, et d'autre part pour la reproductibilité des méthodes que les environnements tels que Jupyter permettent [271].

La programmation lettrée n'étant pas « forcée » dans les notebooks, son utilisation va dépendre des besoins des utilisateurs [275]. Ainsi les usages de notebooks peuvent être :

- exploratoires avec du prototypage et de l'analyse interne, et souvent peu d'explications par rapport au code.
- explicatifs pour le partage et la reproductibilité de résultats, qui sont parfois l'extension de premiers notebooks exploratoires.

Ces deux usages peuvent être en tension [276] : un notebook exploratoire permet de garder une trace linéaire et exhaustive de l'histoire de l'analyse, laissant notamment de la place aux résultats négatifs [277], mais peut s'avérer peu intelligible. Là où sa mise en forme et réorganisation pour le rendre explicatif, tronquera des éléments d'exploration peu fructueux. Concernant les notebooks explicatifs, les destinataires peuvent aussi bien être des collègues et pairs, étudiants, grand public ou encore son moi futur [275].

Aussi des bonnes pratiques peuvent être adoptées afin de répondre au mieux aux besoins de ces publics.

II.4.2.3. *Bonnes pratiques et fonctionnalités des notebooks*

Pimentel et al. [271] ont synthétisé des recommandations de bonnes pratiques pour les notebooks. On peut notamment retenir l'usage :

- d'un **titre court** pour le notebook,
- de **cellules Markdown de contexte** au début, et d'explication à la fin
- de **code organisé en classes et testé**, associé à une version des dépendances dont les imports sont situés en début de notebook.
- de **tests dans un environnement propre** pour vérifier le fonctionnement des dépendances, avec une exécution du notebook en intégralité de haut en bas avant de la partager.

L'extension Jupyter Lab *Jupyter* [271] permet de suivre au mieux ces recommandations pratiques. La mise en place d'un environnement dédié pour l'usage des notebooks est détaillée dans l'Annexe 8, et la section III.2.3.2 en présente un exemple concret.

En outre, privilégier des éléments éloignés du code source des modèles dans le notebook permet d'assurer une vision synthétique, luttant contre la surcharge d'information tout en maintenant un accès transparent vers les sources des modèles : c'est un **compromis entre transparence et compréhensibilité**, y compris pour des publics non-développeurs.

Concernant les fonctionnalités concrètes des notebooks, Lau et al. [269] présentent un espace de conception (« *Design Space* »), et la manière dont 60 solutions académiques et industrielles s'y positionnent (Annexe 9). Y sont formalisées les variations dans les fonctionnalités des notebooks suivant 10 dimensions regroupées en 4 étapes majeures :

1. l'import des données dans le notebook,
2. l'édition du code et la rédaction, ainsi que le versionnage et la collaboration,
3. l'exécution du code pour générer les résultats,
4. la publication des sorties du notebook.

Aussi, si de nombreux environnements aux fonctionnalités variées existent pour les notebooks (voir le Tableau 17 dans l'Annexe 9), des limites demeurent pour une utilisation facilitée et généralisée.

II.4.2.4. *Limites et perspectives pour les notebooks*

Les notebooks apparaissent comme des objets intéressants pour documenter les processus de recherche par les académiques, et de bons vecteurs de reproductibilité de ces **processus**. Toutefois cette reproductibilité va également dépendre de la relation entre le notebook et l'utilisateur, pour qu'il ou elle puisse reproduire une analyse à travers son **parcours** dans le notebook. Aussi, au-delà de l'objet seul, les notebooks font face à plusieurs limites et difficultés d'utilisation, notamment documentées par Chattopadhyay et al. [278]. En reprenant les étapes de Lau et al. [269] évoquées précédemment, le Tableau 5 dresse un résumé de ces difficultés.

Étape	Difficultés
1. Import des données	- Le chargement des données (notamment si volumineuses et multi-sources) peut être fastidieux et répétitif.
2. Édition de code, rédaction, versionnage, collaboration	- La gestion du code se déroule sans interface dédiée, notamment pour l'import des dépendances. - Le versionnage des notebooks est dysfonctionnel [275], et l'archivage n'est pas facilité. - Partage et collaboration autour de notebook (e.g. résultats interactifs, édition collaborative) généralement non-supporté.
3. Exécution du code pour générer les résultats	- Nombreux copiés/collés pour l'exploration et l'analyse, et délais voire erreurs lors de l'exécution de cellules.
4. Publication des sorties du notebook	- La reproductibilité dépend grandement de l'environnement et des dépendances mis en place. - Le contrôle d'accès est un procédé manuel pouvant laisser fuiter des données sensibles en cas d'erreur. - L'utilisation des notebooks en tant que produits peut réclamer des compétences de développement qui dépassent celles des chercheurs.

Tableau 5 : Résumé des difficultés dans l'usage de notebooks. Source : auteur d'après Chattopadhyay et al [278] et sources mentionnées.

En particulier concernant les difficultés de versionnage des notebooks, qui apparaissent à la fois comme importantes, difficiles à gérer et réclamées par les académiques [276,278], elles s'expliquent car le versionnage (notamment via git) est d'abord conçu pour des fichiers lisibles par des acteurs humains. Or les notebooks sont des documents riches regroupant dans un seul fichier des éléments de code source, Markdown, HTML et images. Ce fichier au format JSON, sera lisible avec ses cellules via Jupyter, mais sa source est illisible pour des acteurs humains. Un élément de réponse face à cette limite des notebooks réside dans les pratiques : le développement ne doit pas être mené dans le notebook mais bien dans les outils de modélisation, comme cela sera présenté dans la section III.2.5.1. Malgré tout, du développement collaboratif autour de notebook peut advenir, aussi certains outils comme l'extension jupyterlab-git, nbdime ou ReviewNB¹⁵ permettent de faciliter cette tâche.

De manière générale, ces limites sont autant d'opportunités pour des développements futurs. De nombreuses extensions existent ou sont en cours de développement pour pallier ces difficultés [278], comme présentées dans l'Annexe 9. Toutefois un déploiement des différentes extensions peut s'avérer complexe d'une part à développer, et d'autre part à utiliser pour un public académique pas nécessairement formé en génie logiciel [231,279]. Aussi une perspective évoquée par Lau et al. consisterait en la mise en place d'une « grammaire » pour les notebooks,

¹⁵ Répertoires de jupyterlab-git : <https://github.com/jupyterlab/jupyterlab-git> ; nbdime : <https://github.com/jupyter/nbdime> ; et ReviewNB : <https://github.com/ReviewNB>

permettant de piocher les extensions souhaitées dans une boîte à outil partagée. Une perspective supplémentaire abordée par ces auteurs est d'élargir le groupe d'utilisateurs des notebooks au-delà de la science des données, pour en percevoir d'autres usages et développements possibles [269]. D'autres disciplines se sont d'ailleurs déjà emparées de cet objet, avec par exemple le projet de démonstrateur Jupyter pour les sciences humaines et sociales, Callisto [280]. Le chapitre suivant s'intéresse justement à la mobilisation des objets notebooks dans la communauté académique de la modélisation énergétique, ainsi qu'au contact d'acteurs de la société et du monde socio-économique.

II.5. Bilan

Les **processus de modélisation énergétique ouvert** comprennent différents éléments :

données ouvertes → *modèle énergétiques open-source* → *article scientifique open-access*,

intégrant des hypothèses ainsi que le traitement ouvert des données. Le choix de l'ouverture de ces éléments doit être réalisé par leurs détenteurs selon le principe : *aussi ouvert que possible, aussi fermé que nécessaire*. L'ouverture est alors :

- **Juridique** avec un choix de licence ouverte adapté aux modes de diffusion souhaité et au type de ressources.
- **Technique** en respectant les principes FAIR : *Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable*, notamment au moyen de métadonnées et plateformes de versionnage, développement et archivage.

La stratégie de développement des outils de modélisation énergétique doit éclairer ces différentes questions :

- Quel est l'**objectif** lors du développement ?
- Dans quelle **phase d'étude** du système énergétique ?
- Quelles **fonctionnalités** et formalismes sont nécessaires ?
- Quelle **diffusion** du projet est visée ?
- Est-ce que des **outils existants** répondent à ces critères ?

Ainsi un choix devra être fait entre :

- **Développement propre** d'outil : avec un formalisme propre, un contrôle total de l'outil et une visibilité des équipes de développement.
- **Contribution** à des outils existants : pour réduire les efforts parallèles et rejoindre une communauté au service d'un outil de référence.

Pour faire ce choix, la stratégie doit bien être réfléchie et notamment les caractéristiques désirées de l'outil : approche de modélisation, échelles spatio-temporelles, vecteurs énergétiques, utilisabilité et aspects sociaux. Le développement de l'outil OMEGAAlpes fournit un exemple réflexif de stratégie, où le développement propre a permis de tirer de nombreuses leçons mais s'est aussi privé d'une communauté plus vaste de développement. Ce sont finalement les cas d'études dans leur aspects perceptibles et reproductibles pour les acteurs qui sont privilégiés dans ce cadre.

Si la définition de la reproductibilité est plurielle, on entend ici par **reproductible** l'obtention de résultats cohérents en utilisant les mêmes données d'entrée, les mêmes étapes, méthodes et codes de calcul, et les mêmes conditions d'analyse. Les **notebooks**, des documents de programmation lettrée mêlant code et langage naturel, apparaissent alors comme des objets supports pour cette reproductibilité, à mobiliser en modélisation énergétique.

Chapitre III

La méthode ORUCE (Open and Reproducible Use Case For Energy) - Rendre les pratiques de science ouverte accessibles aux acteurs de l'énergie par le biais des cas d'étude

Dans la mythologie égyptienne, l'œil d'Horus a une fonction de restauration de la complétude, de vision de l'invisible. [281]

SOMMAIRE

Chapitre III La méthode ORUCE (Open and Reproducible Use Case For Energy) - Rendre les pratiques de science ouverte accessibles aux acteurs de l'énergie par le biais des cas d'étude
79

Résumé du chapitre.....	80
III.1. Des pratiques aux processus de modélisation énergétiques ouvertes.....	81
III.2. La méthode ORUCE : ouvrir le processus de modélisation énergétique	81
III.2.1. ORUCE : définition et principes.....	81
III.2.2. Le processus ORUCE : des données brutes aux résultats.....	82
III.2.3. Un cas d'application simple de la méthode ORUCE : autoconsommation photovoltaïque d'un foyer.....	83
III.2.3.1. Informations générales	83
III.2.3.2. Gestion de l'environnement.....	85
III.2.3.3. Gestion des données.....	86
III.2.3.4. Présentation du modèle énergétique et modélisation.....	87
III.2.3.5. Gestion des résultats	88
III.2.3.6. Conclusion du cas d'étude	89
III.2.4. Spécificités de la méthode ORUCE	89
III.2.4.1. Acteurs liés à la méthode ORUCE	89
III.2.4.2. Données archétypales, une entrée pour la méthode ORUCE	90
III.2.4.3. Le cas d'étude : un objet d'échange intermédiaire et vecteur pérenne de capitalisation	91
III.2.5. L'objet ORUCE.....	93

III.2.5.1.	Forme et formulation type pour l'objet ORUCE	93
III.2.5.2.	Deux types d'objets ORUCE : recherche et médiation.....	94
III.3.	Discussion et éléments de validation de la méthode ORUCE	96
III.3.1.	Discussion et limites de la méthode ORUCE.....	96
III.3.2.	Éléments de validation : transparence, reproductibilité et accessibilité.....	97
III.4.	Bilan et perspectives.....	102

Résumé du chapitre

Ce chapitre présente la méthode ORUCE (Open and Reproducible Use Cases for Energy), pensée pour rendre les principes et les avantages de la modélisation énergétique ouverte accessibles. C'est un processus complet allant des données d'entrée jusqu'aux résultats en passant par les modèles, et bouclant avec les acteurs de l'énergie. La méthode se concentre notamment sur les cas d'étude comme bons vecteurs de capitalisation de la connaissance et de reproductibilité. La méthode ORUCE est présentée dans ses principes, ses étapes clefs, et sa forme. Un cas applicatif est proposé, avant de discuter des limites, éléments de validations et perspectives pour cette méthode.

III.1. Des pratiques aux processus de modélisation énergétique ouvertes

Dans les deux chapitres précédents, l'ouverture de la modélisation énergétique a été détaillée dans ses intérêts, notamment par rapport aux modèles propriétaires, et dans ses pratiques avec de nombreux exemples de projets et outils. Au-delà des outils, la modélisation énergétique ouverte s'incarne à toutes les étapes du processus de modélisation énergétique : les données et leur gestion, le choix des objectifs, méthodes et outils ainsi que les résultats et leur interprétation [34]. Chacune des étapes de ce processus est nécessaire pour bénéficier des avantages d'une recherche ouverte et reproductible. De plus, la modélisation énergétique ouverte fait elle-même face à différents défis qui ont été abordés précédemment, comme par exemple la surcharge d'information, ou plus généralement la considération des acteurs humains. Un enjeu majeur pour la recherche dans le domaine de l'énergie est alors l'ouverture des processus complets plutôt que la seule ouverture des ressources, ainsi que l'acculturation des publics académiques aux pratiques de science ouverte pour tout ce processus. Ce chapitre présente la méthode ORUCE : un processus de modélisation énergétique ouvert et reproductible, depuis les données brutes d'entrée jusqu'aux résultats et leur interprétation, qui vise à rendre les principes et intérêts de la modélisation énergétique ouverte accessibles aux chercheurs et chercheuses du domaine, ainsi qu'aux acteurs de l'énergie.

Les différentes visions de processus de modélisation énergétique abordées dans la section II.2.1.1 posent de premières pierres, et contribuent à l'élaboration de processus intégrés de modélisation énergétique ouverte. Bien souvent, c'est l'ouverture et la transparence qui sont mis en avant : la modélisation énergétique est ouverte légalement grâce aux licences ouvertes, techniquement grâce à l'accès en ligne, et financièrement de par la gratuité des contenus. Demeure alors la question de l'accessibilité en termes de compréhension par les acteurs de l'énergie et leur place dans ce processus, mais aussi de la reproductibilité des contenus. L'ouverture seule ne garantit pas la pérennité, la transmission de connaissances ou encore la capacité à appliquer les solutions énergétiques pour différentes conditions. En outre, les travaux cités sont souvent descriptifs de scénarios énergétiques ouverts appliqués à des échelles spatiales et temporelles élevées (e.g. avec des scénarios énergétiques nationaux horizon 2050), délaissant les échelles locales.

- ➔ Ce chapitre propose un processus énergétique applicable pour des études énergétiques locales et en lien avec les acteurs, pensé comme ouvert et reproductible, et associé à des pratiques de mise en forme et des exemples concrets.

III.2. La méthode ORUCE : ouvrir le processus de modélisation énergétique

III.2.1. ORUCE : définition et principes

ORUCE (pour *Open and Reproducible Use Case for Energy*) est une méthode s'appuyant sur la littérature autour de la modélisation énergétique ouverte et les travaux menés lors de cette thèse. Elle a été présentée à la conférence Building Simulation en 2021 [282]. ORUCE est pensée comme un processus transférable, qui vise à rendre les principes et intérêts de la modélisation énergétique ouverte accessibles quel que soit le modèle ou l'outil utilisé. La méthode se concentre notamment sur les cas d'études, ou *use cases*, comme bons vecteurs de capitalisation de la connaissance et de reproductibilité des études. La méthode ORUCE est présentée Figure

III.1. Elle décrit un processus de modélisation énergétique entièrement ouvert, depuis les données d'entrée jusqu'aux résultats, bouclant avec les acteurs. Les différentes étapes de la méthode ORUCE sont présentées ci-après, et illustrées avec un exemple applicatif.

III.2.2. Le processus ORUCE : des données brutes aux résultats

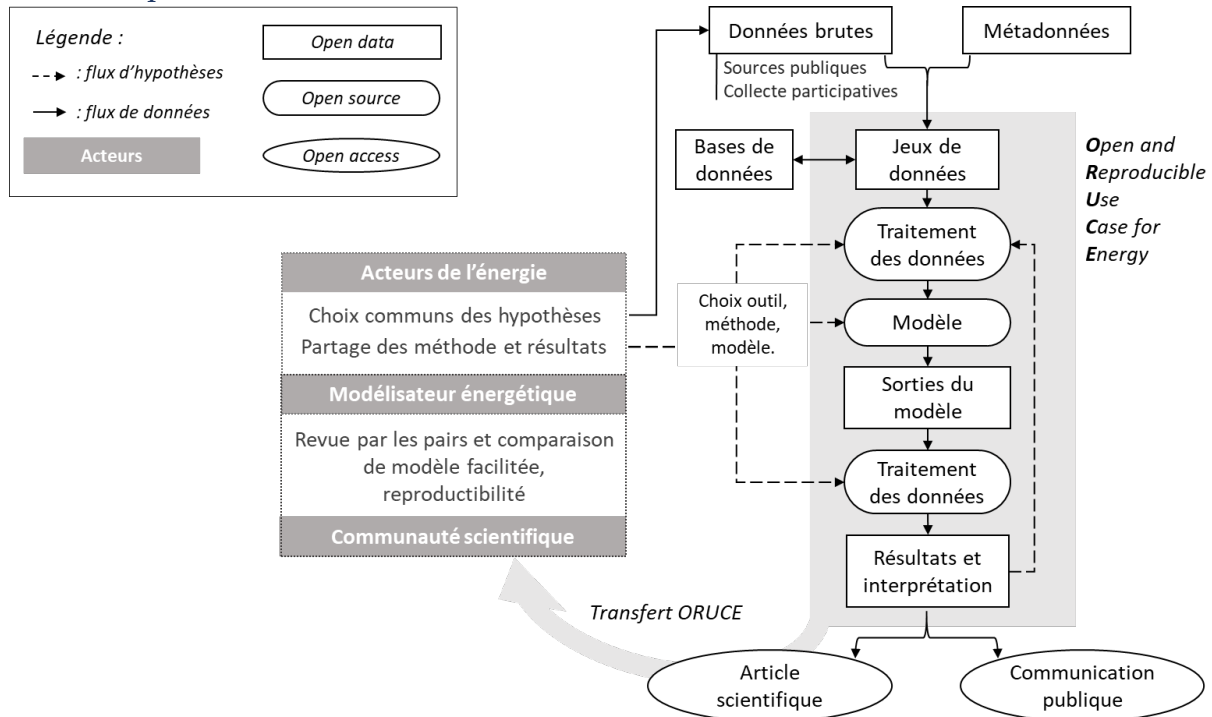


Figure III.1 : Diagramme de la méthode ORUCE et parties prenantes associées. Source : auteur.

En entrée du processus ORUCE se trouvent les **données brutes**. Il peut s'agir de données représentatives provenant de sources ouvertes ou de données anonymisées (section II.2.1.2) basées sur de vastes ensembles de donnée. Ces données brutes sont ensuite associées à des **métadonnées** pour les mettre en contexte et les aligner autant que possible avec les principes FAIR discutés dans la section II.2.2.2. Les données brutes associées aux métadonnées donnent des **jeux de données** qui peuvent eux-mêmes enrichir des bases de données ouvertes au sein des laboratoires. Ces données peuvent être qualifiées de données archétypales, dont l'idée est détaillée dans la section suivante.

Le **traitement et la gestion des données** sont également mis à disposition sous forme de code source ouvert. Le processus complet étant ouvert, l'**objectif et les hypothèses de l'étude** peuvent être choisis en commun entre les modélisateurs énergétiques et les acteurs impliqués, notamment fonction de la phase d'étude : conception, pilotage, rénovation ou encore fin de vie. Les hypothèses sont énoncées explicitement et affectent le traitement des données d'entrée et de sortie ainsi que le modèle. Cette déclaration claire rend l'influence des hypothèses sur les résultats transparente [23] : les hypothèses sont propagées de la même manière que les incertitudes peuvent l'être.

C'est ensuite l'expertise des modélisateurs énergétiques ainsi que l'objectif et les hypothèses de l'étude choisis en commun qui conduiront au **choix de la méthode** (problème direct ou indirect, choix de la méthode d'optimisation, etc.), du logiciel libre et ouvert et enfin, **du**

modèle ouvert. La sortie brute du modèle est ensuite également traitée par le biais d'un code source ouvert pour fournir les résultats de l'étude et leur interprétation. Ce processus de l'entrée aux résultats n'est pas réellement linéaire mais nécessite généralement plusieurs **itérations** avant d'accéder aux résultats finaux. Cela est notamment dû aux d'incertitudes de principes, sur les objets de la connaissances et sur la connaissance portée par les acteurs humains, rendant le processus comme les résultats de modélisation non prédéterminés [137] (section I.3.2). Autrement dit, il existe plusieurs manières de résoudre un cas d'étude, et plusieurs itérations seront nécessaires pour trouver la manière la plus satisfaisante de la faire pour les acteurs impliqués. Ces itérations peuvent être vues comme une boucle récursive, où chaque itération fait progresser dans la formulation et compréhension du cas d'étude par les acteurs. Concrètement, les itérations successives peuvent par exemple permettre de choisir les objectifs et indicateurs de résultats, ou encore les paramètres de modélisation (précision, domaine des variables, ...).

Enfin, les **articles** ainsi que les **communications** basées sur les résultats et l'interprétation de l'étude devraient être fournis en accès libre, et liés aux cas d'étude, bénéficiant ainsi des avantages déjà mentionnés de la modélisation énergétique ouverte, telle que la facilitation de la revue par les pairs, la comparaison de modèles et, de manière générale, la reproductibilité. La reproductibilité inférentielle (section II.4.1), avec l'utilisation d'un cas d'étude ORUCE pour d'autres études servent l'extension de la méthodologie.

III.2.3. Un cas d'application simple de la méthode ORUCE : autoconsommation photovoltaïque d'un foyer

III.2.3.1. Informations générales

Un exemple simple d'application est proposé pour illustrer la méthode ORUCE. Il s'agit du cas d'étude d'un foyer en autoconsommation photovoltaïque (PV) en phase de pré-étude. Le but est d'assurer la gestion optimale d'un système énergétique donné grâce à l'outil OMEGAAlpes. L'étude porte sur un seul bâtiment représentatif équipé de panneaux photovoltaïques et d'un stockage par batterie. La Figure III.2 présente le processus de modélisation énergétique et les acteurs de ce cas d'étude en reprenant le formalisme introduit plus tôt.

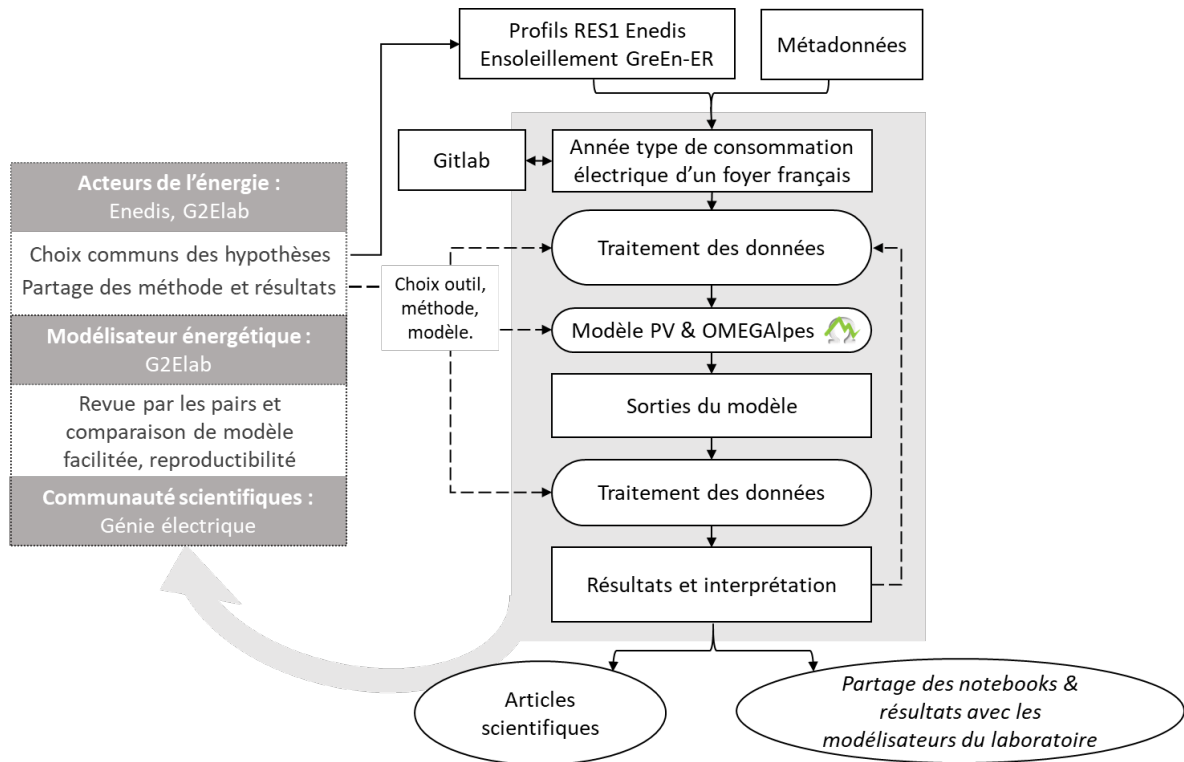


Figure III.2 : Diagramme de la méthode ORUCE et parties prenantes associées pour le cas d'étude autoconsommation PV. Source : auteur.

Un notebook est associé et mis à disposition sur le gitlab de l'outil OMEGAlpes. Ce notebook comprend différentes parties qui seront détaillées dans la section III.2.5.1. La Figure III.3 présente une vue d'ensemble de ce notebook, qui est par ailleurs disponible dans l'Annexe 10, et en ligne suivant le matériel supplémentaire [C].

III.2.3.3. Gestion des données

Toutes les données d'entrée du modèle énergétique proviennent de bases de données ouvertes, et sont donc directement accessibles (Figure III.4) :

- Le profil de consommation électrique annuel est modélisé à partir des profils types dits « RES1 » des sites résidentiels pour l'année 2019, disponibles sur le site internet du gestionnaire du réseau de distribution français Enedis sous la licence Etalab v2.0. On considère une consommation électrique moyenne de 4586 kWh par an et par foyer, calculée à partir du nombre de foyers raccordés au réseau électrique français selon la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), et de la consommation électrique finale du secteur résidentiel français.
- Les données d'irradiation solaire directe (DNI) et diffuse (DHI) pour l'année 2019 sont extraites d'une station météorologique située sur le toit du bâtiment GreEn-ER à Grenoble. Ces données sont stockées dans une base de données influxDB sous une licence Public Domain Dedication and License version v1.0. A partir de ces profils d'irradiation, ainsi que des valeurs de surface, d'azimut et d'inclinaison des panneaux photovoltaïques, il a été possible de calculer les profils de production photovoltaïque avec le modèle présenté par Nguyen et al. [283].

```
Entrée [15]: # Chargement des données
yearly_data = read_data(file_name='./data/consumption_and_irradiance_data.csv')
yearly_irradiance = yearly_data[0]
yearly_consumption = yearly_data[1]
```

```
Entrée [16]: # plot
fig2, ax2 = plt.subplots()
ax2.plot(yearly_pv_power_values, label='Production PV')
ax2.plot(yearly_cons_values, label='Consommation')
```

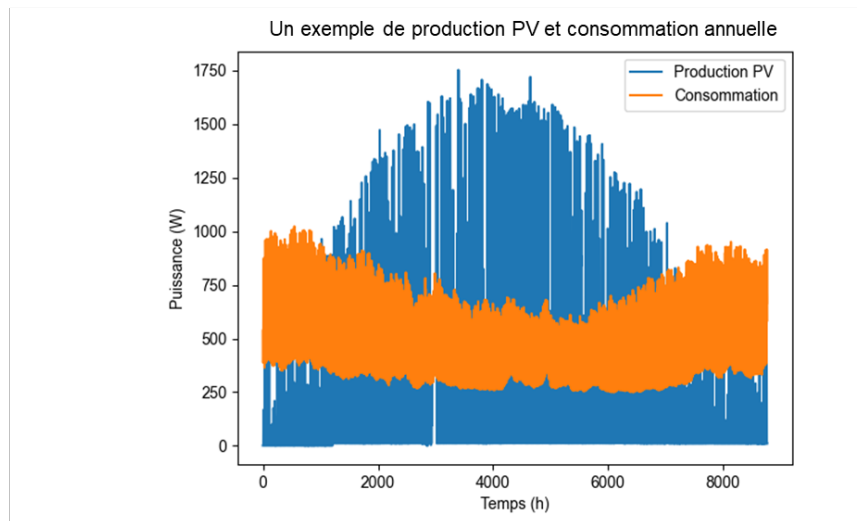


Figure III.4 : Import et affichage des données dans un notebook. Source : auteur.

Les métadonnées associées aux jeux de données sont présentées pour les mettre en contexte, et les données sont ensuite affichées, puis vérifiées, corrigées et assemblées. Les scripts utilisés sont mis à disposition dans le notebook. Les jeux de données sont également sauvegardés dans le répertoire gitlab.

III.2.3.4. Présentation du modèle énergétique et modélisation

L'objectif de ce cas d'étude est d'appliquer la méthode ORUCE avec des modèles énergétiques ouverts, permettant aux utilisateurs de comprendre la méthode et faire varier les données, les hypothèses et les objectifs, ou encore d'affiner le modèle. Aussi un modèle simplifié de système d'autoconsommation photovoltaïque a été assemblé avec l'outil OMEGAlpes. OMEGAlpes permet de générer automatiquement un problème d'optimisation MILP, et de le résoudre en utilisant le package Python PuLP [247] qui assure la traduction des objets OMEGAlpes.

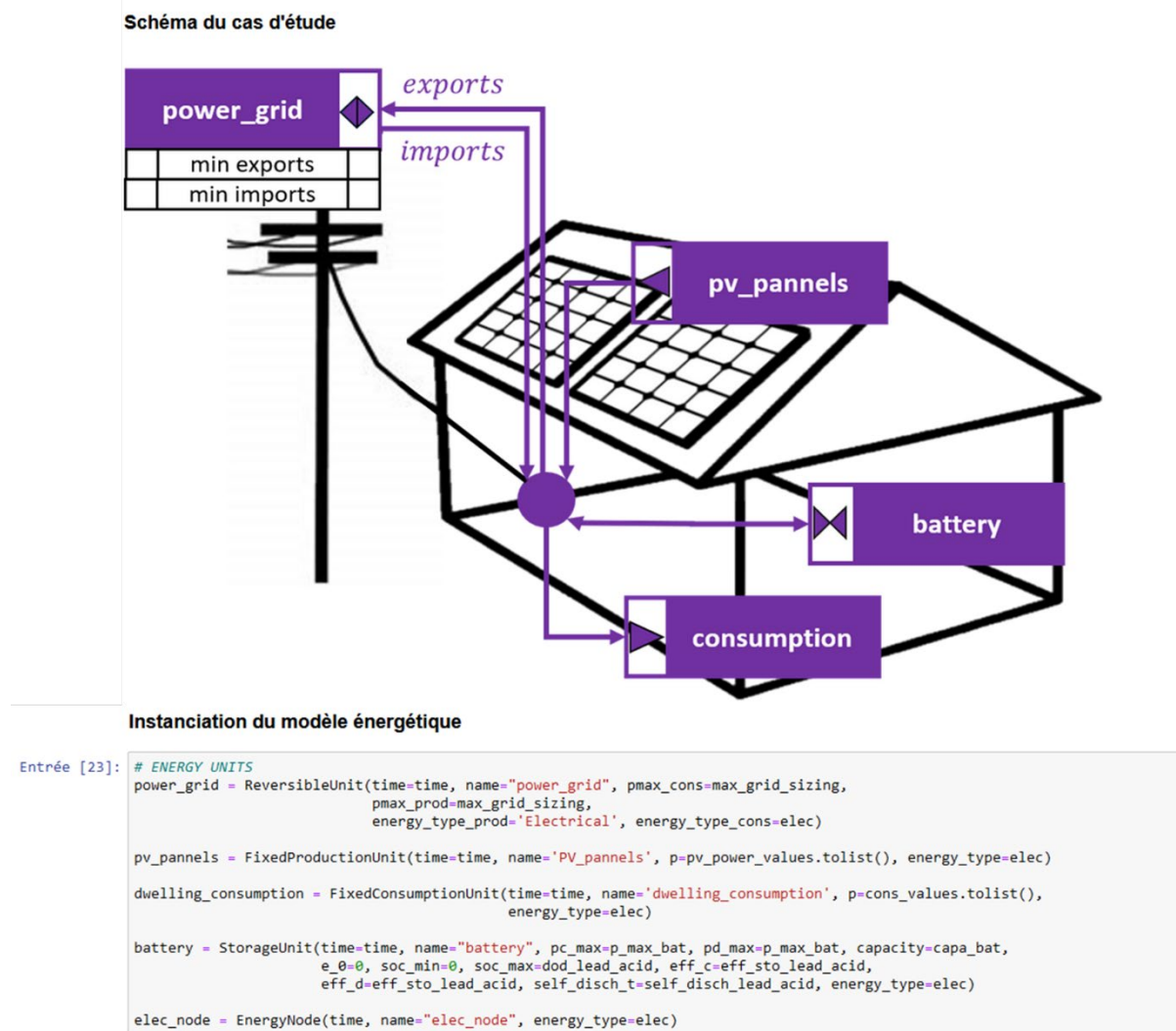


Figure III.5 : Schéma représentatif d'un cas d'étude autoconsommation photovoltaïque avec le formalisme de l'outil OMEGAlpes [188], et instanciation du modèle. Source : auteur, Morriet et Pajot.

La présentation du modèle énergétique comprend un schéma descriptif (Figure III.5), les hypothèses principales du modèle et le choix d'objectif.

La paramétrisation du modèle est également renseignée à cette étape, avec l'étude sur une période de temps au choix au pas de temps horaire pour un dimensionnement de système donné issu d'une étude précédente [241] : panneaux PV avec inclinaison de 25.4°, un azimut de 23.8° et une surface de 12.2m², et batterie de 434 kWh.

La modélisation énergétique comprend l'instanciation des différentes unités énergétiques dans OMEGAlpes (*power_grid*, *pv_panels*, *dwellling_consumption*, *battery* et *elec_node*) et la résolution du problème d'optimisation. Ici, on choisit de minimiser les imports du réseau pour maximiser le taux d'autoproduction. On ajoute également un objectif de minimisation des pertes dans les batteries, formalisé ci-dessous.

$$pertes_{bat} = \sum_{horizon} dt * (selfdisch * e_{bat}[t] + (P_{ch}[t] + P_{dech}[t]) * (1 - eff_{bat})) \quad (1)$$

Avec dt le pas de temps (e.g. avec des pas de temps 15 minutes, $dt = 1/4$), $e_{bat}[t]$ l'énergie stockée à un instant t , $self_disch$ le taux de décharge de la batterie, $P_{ch}[t]$ la puissance de charge à l'instant t , $P_{dech}[t]$ la puissance de décharge à l'instant t , et eff_{sto} l'efficacité de charge et décharge.

III.2.3.5. Gestion des résultats

Avant d'accéder aux résultats finaux, plusieurs itérations des données brutes aux résultats ont été nécessaires. Ces itérations, mentionnées dans la méthode ORUCE, ont permis de choisir des paramètres pertinents :

- les paramètres d'optimisation : algorithme de résolution (solver) ; nombre de pas de temps.
- les objectifs : autoconsommation ou autoproduction ;
- les limites des variables : dimensionnement et choix des technologies de batteries et de panneaux PV.

Les résultats de la gestion de la batterie sur une période de temps peuvent être observés (Figure III.6). Pour des périodes d'étude supérieures à 3 mois, le solveur open-source CBC utilisé n'est pas performant et le temps de calcul est trop long : des solveurs professionnels doivent être utilisés. La présente les flux d'énergie pour le foyer lors d'une semaine travaillée en août 2019. Si la gestion des batteries est ici quelque peu triviale, le modèle OMEGAlpes est accessible pour des études plus complexes sur ce système énergétique.

```
Entrée [28]: # Plot results
plt = plot_node_energetic_flows(elec_node)
plt.ylabel("Puissance (W)") # changing label from default (kW) to W
plt.show()
```

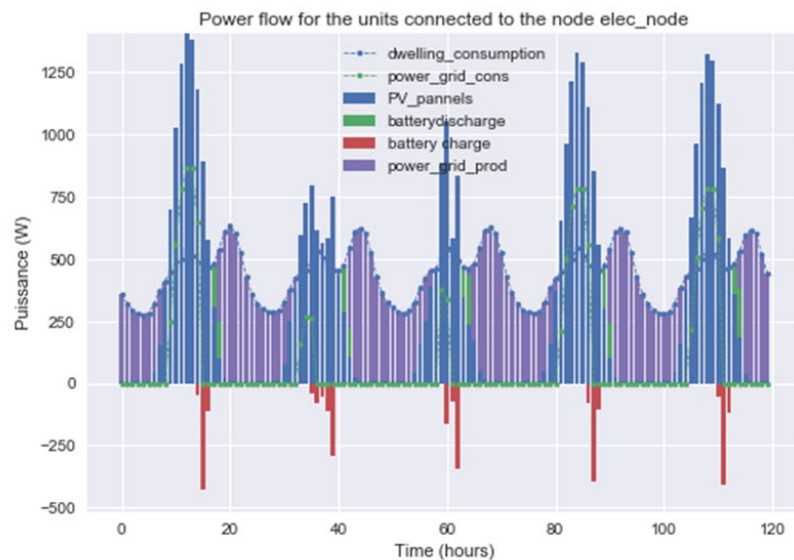


Figure III.6 : Courbes des flux énergétiques pour le cas d'étude d'autoconsommation PV pour une semaine travaillée en août 2019, issus de l'outil OMEGAAlpes. Source : auteur

III.2.3.6. Conclusion du cas d'étude

La méthode ORUCE offre ici la possibilité d'adapter le cas d'étude à différentes situations, par exemple en faisant varier les technologies de batteries ou de panneaux PV, ou en sélectionnant les données d'entrée en fonction des nouvelles caractéristiques de l'étude et en tenant compte des incertitudes. Elle permet également de comparer différents modèles énergétiques et techniques d'optimisation. Haessig et al. [104] ont proposé des bancs tests open-source pour l'optimisation du pilotage d'un foyer en autoconsommation PV. Ils soulignent que le partage de bancs tests open source permet de comparer différentes méthodes en termes de performances et de mise en œuvre concrète, et de mettre en évidence certains choix subjectifs de modélisation. Les auteurs se concentraient sur la comparaison des méthodes d'optimisation sur un cas d'étude, là où ce chapitre s'attache à la méthode du partage des cas d'étude.

On notera qu'aucun acteur, si ce n'est la communauté scientifique, n'intervient réellement ici. D'autres exemples plus détaillés et une introduction aux enjeux de l'autoconsommation PV seront présentés dans la section IV.3.

III.2.4. Spécificités de la méthode ORUCE

III.2.4.1. Acteurs liés à la méthode ORUCE

Comme présenté dans la Figure III.1, la méthode ORUCE est à l'intersection des *acteurs de l'énergie*, de la *communauté scientifique*, et des *modélisateurs* (i.e. développeurs de modèles énergétiques). Comme présenté précédemment la Figure II.6, la communauté scientifique comprend aussi bien des développeurs que des utilisateurs de modèles, et ces deux rôles peuvent se recouper (section II.3.3.6). Les acteurs de l'énergie peuvent être publics, privés ou

citoyens, et intervenir à différentes échelles : la méthode ORUCE est notamment pensée pour être appliquée aux échelles locales, mais peut être étendue plus largement. Les acteurs engagés dans un projet de système énergétique peuvent être répartis en différentes catégories [122] :

- les *opérateurs énergétiques*, tels que les producteurs, fournisseurs, consommateurs, gestionnaires de réseau ou encore agrégateurs (e.g. respectivement EDF, Enercoop, un foyer, Enedis et Energy Pool),
- les *régulateurs*, comme les autorités locales (e.g. Grenoble Alpes Métropole ou plus généralement la Commission de Régulation de l'Énergie),
- et les *porteurs* (ou développeurs) de projet, qui n'appartiennent pas aux deux catégories précédentes mais qui portent le projet énergétique et assurent les relations avec tous les acteurs.

D'autres acteurs indirectement engagés dans la conception et le fonctionnement du système énergétique peuvent également interagir, tels que les architectes ou concepteurs de composants techniques par exemple.

III.2.4.2. Données archétypales, une entrée pour la méthode ORUCE

Il est souvent difficile d'avoir accès à des jeux de données énergétiques ouverts [36], car ces données sont sensibles : pour des questions de propriété intellectuelle pour les données de réseau par exemple, et de RGPD pour les données de consommations individuelles. Nous introduisons l'idée de données archétypales, comme entrées pour ORUCE. Les **données archétypales** sont définies comme des jeux de données ouverts, associés aux métadonnées qui les caractérisent. Elles peuvent provenir :

- de sources ouvertes telles que les bases de données d'institutions publiques (e.g. données météo GreEn-ER) ou bien d'ensembles de données anonymisées obtenues à partir d'une collecte participative (*crowdsourcing*) comme suggéré par Bazilian et al. [100]. Sans être propres au cas d'étude, elles sont représentatives dans les valeurs et tendances (e.g. bases de données de consommation électrique Enedis)
- de données brutes liées à un projet, mises sous licence ouverte avec l'accord du développeur. Ces données sont alors utilisables sur le cas d'étude et sur d'autres analyses semblables.

Les données archétypales permettent de mener à bien l'ensemble du processus de modélisation énergétique ouvertement jusqu'aux résultats associés afin de comprendre la démarche dans son ensemble. Elles laissent la porte ouverte à l'utilisation de données privées ou fermées par des parties prenantes qui ne partageront pas leurs données pour des raisons de confidentialité. Cela peut par exemple permettre à des collectifs citoyens ou gestionnaire de réseau d'utiliser leurs données pour obtenir des résultats personnalisés, en ouvrant les métadonnées associées et non les données sensibles (*as closed as necessary*). En outre, les données archétypales peuvent être mobilisées dans d'autres cadres et études énergétiques. Au-delà de l'interopérabilité de données [284], cette flexibilité d'usage permet une forme « d'interopérabilité d'acteurs », c'est-à-dire la capacité de deux ou plusieurs acteurs d'échanger l'information et d'utiliser cette information qui a été échangée de manière fiable et confiante.

Ce concept de données archétypales est à rapprocher de celui de données synthétiques (section II.2.1.2). Les données archétypales ne sont toutefois pas nécessairement reconstruites, mais peuvent directement provenir des mesures mises à disposition librement lorsque c'est possible, comme on le verra par exemple sur le cas d'étude de la section IV.2.4.

La mise à disposition des données archétypales dans les cas d'étude peut être réalisée sous deux formes :

1. Directement adjoindre au cas d'étude un fichier de données brutes avec métadonnées, assurant un bon degré de reproductibilité des méthodes grâce au fichier exact utilisé dans l'étude.
2. Fournir un script pour récupérer les données à leur source (e.g. base de données publique), ce qui permet d'avoir accès à des données mises à jour (e.g. évolution des mix énergétiques, des profils de consommation selon la date), voire de répliquer l'étude avec des données d'entrée différentes. Cela comporte toutefois le risque de ne plus retrouver des résultats identiques, voire de ne plus avoir accès aux sources si la base de données disparaît.

Dans le cadre d'ORUCE, nous recommandons de cumuler les deux formes pour bénéficier des avantages mentionnés : un fichier brut associé au cas d'étude en plus d'un script d'import des données depuis des sources mises à jour (Figure III.7). Cela a été illustré dans l'exemple (section III.2.3.3) où les données d'ensoleillement et de consommation électrique sont à la fois conservées dans le répertoire Gitlab, et un script permet de les extraire de la plateforme météo MHI et du site de Enedis.

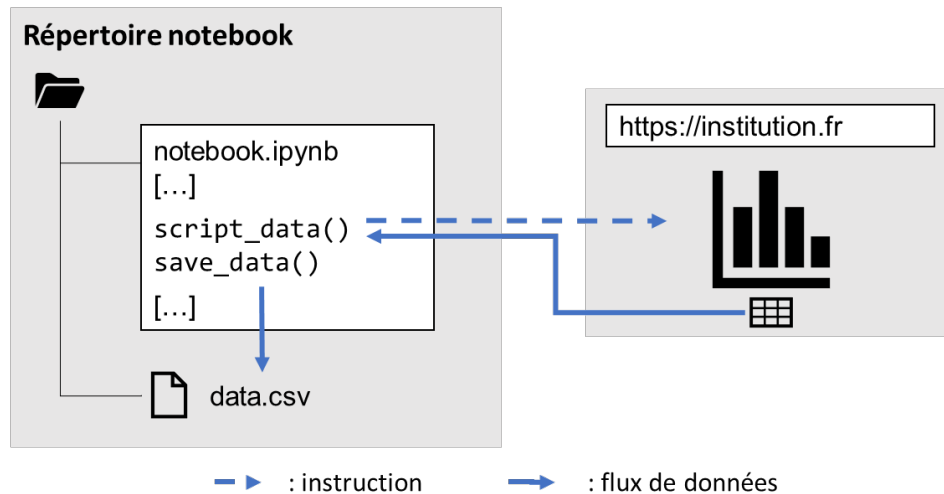


Figure III.7 : Gestion des données archétypales dans un notebook ORUCE. Source : auteur.

La publication de données (i.e. rendre les données disponibles, documentées, citables et potentiellement validées) dans des entrepôts pérennes, et leur association avec un *data paper* [186,285] permet de disposer d'une source pérenne : c'est une bonne pratique à démocratiser.

III.2.4.3. Le cas d'étude : un objet d'échange intermédiaire et vecteur pérenne de capitalisation

La méthodologie ORUCE proposée met l'accent sur le **cas d'étude** ou *use case*, c'est-à-dire le processus ouvert qui va des données brutes originales aux résultats et à l'interprétation d'une étude donnée. La capitalisation et mise à disposition des cas d'étude permet de garder la trace

de l'ensemble de l'histoire de l'analyse [23] et de relier les pratiques ouvertes de modélisation énergétique d'une manière complète et réutilisable. Non seulement les résultats et l'interprétation sont fournis, mais aussi la façon dont ils ont été obtenus : les jeux de données ouverts et le traitement sont disponibles, ainsi que le modèle ouvert dans la version dans laquelle il a été utilisé, avec l'objectif et les hypothèses de l'étude. La construction du modèle énergétique n'est qu'une partie du processus : de nombreux choix sont faits au-delà de la modélisation, et notamment le choix des objectifs et de l'interprétation [34]. Les cas d'étude permettent ainsi d'intégrer au processus des éléments de formulation du problème en plus de ses éléments de résolution techniques, capitalisant la *stratégie* de résolution au sens de Edgar Morin [139]: se construisant au cours de l'action mais disposant de séquences programmées (e.g., les modèles énergétiques). Le développement et partage de cas d'étude ouverts est en outre plébiscité par la communauté scientifique du domaine [180].

La focalisation sur les cas d'étude permet de changer le paradigme de capitalisation des connaissances. Les outils et modèles énergétiques sont importants en tant que catalyseurs, mais ils sont amenés à évoluer ou à disparaître, et ne conservent pas de lien au contexte d'utilisation. La capitalisation et le partage ouvert de cas d'étude permet d'assembler plusieurs avantages : on a **accès** aux résultats de l'étude ainsi qu'à l'implémentation de l'outil sous forme de modèle, et son assemblage cohérent avec les données, hypothèses, environnement et paramétrisation. On peut mieux **comprendre et valider** un modèle grâce au contexte spécifique dans lequel il a été construit, en plus du contexte théorique du modèle [34] : le cas d'étude rend ainsi les résultats comme les modèles plus compréhensibles, et permet d'en percevoir les usages et les limites.

Les cas d'étude peuvent être capitalisés dans des Jupyter Notebooks [286] (ci-après dénommés simplement notebooks), des fichiers de code détaillés au moyen de texte ou d'image, et directement partageables, utilisables et modifiables localement ou bien par application web (section II.4.2). Au-delà de la capitalisation, ces notebooks peuvent être utilisés comme objet intermédiaire, voire comme objet frontière [23,287] pour collaborer autour des cas d'étude grâce au niveau de complexité intermédiaire que peuvent avoir les notebooks par rapport au code et à la documentation. Cela permet de réduire la surcharge d'information (section I.2.5), tout en conservant l'accès aux ressources exhaustives et ouvertes. Il est bon de noter que si des niveaux d'ouverture et de qualité parfaits sont difficilement atteignables pour un cas d'étude, proposer un notebook pour échanger et collaborer permet une amélioration continue sur ces deux aspects.

Pour résumer, le partage de cas d'étude ouvert dans des notebooks selon les principes ORUCE permet de :

- **Comprendre** le cas d'étude via un accès aux données, sources, hypothèses, objectifs, code et résultats, avec la possibilité d'une utilisation directe sans installation.
- **Adapter** le cas d'étude à différents scénarios, par exemple en modifiant l'objectif ou les données d'entrée.
- **Comparer** la technique de modélisation ou le modèle utilisé à d'autres, en le remplaçant simplement dans le processus.

Enfin, la méthode ORUCE tend à faire de la modélisation énergétique ouverte le processus par défaut, et vient donc questionner ce qui reste fermé sans être justifié.

III.2.5. L'objet ORUCE

III.2.5.1. Forme et formulation type pour l'objet ORUCE

Comme évoqué précédemment, ORUCE est une méthode présentée sous forme de notebooks. Ils y sont principalement mobilisés en tant que notebooks explicatifs (section II.4.2.2), pour afficher, rendre compréhensible et utiliser le code et les résultats d'un cas d'étude. Le détail des modèles énergétiques sera bien souvent contenu dans le code source de l'outil de modélisation énergétique que le notebook ne fait qu'appeler, afin de conserver l'activité de développement dans un environnement dédié. Une formulation type de ces notebooks est proposée dans un modèle de la méthode ORUCE, que l'on nommera *template* par la suite. Il est disponible en Annexe 12 ainsi qu'en ligne¹⁶, et ses principaux attributs sont présentés dans la Figure III.8..

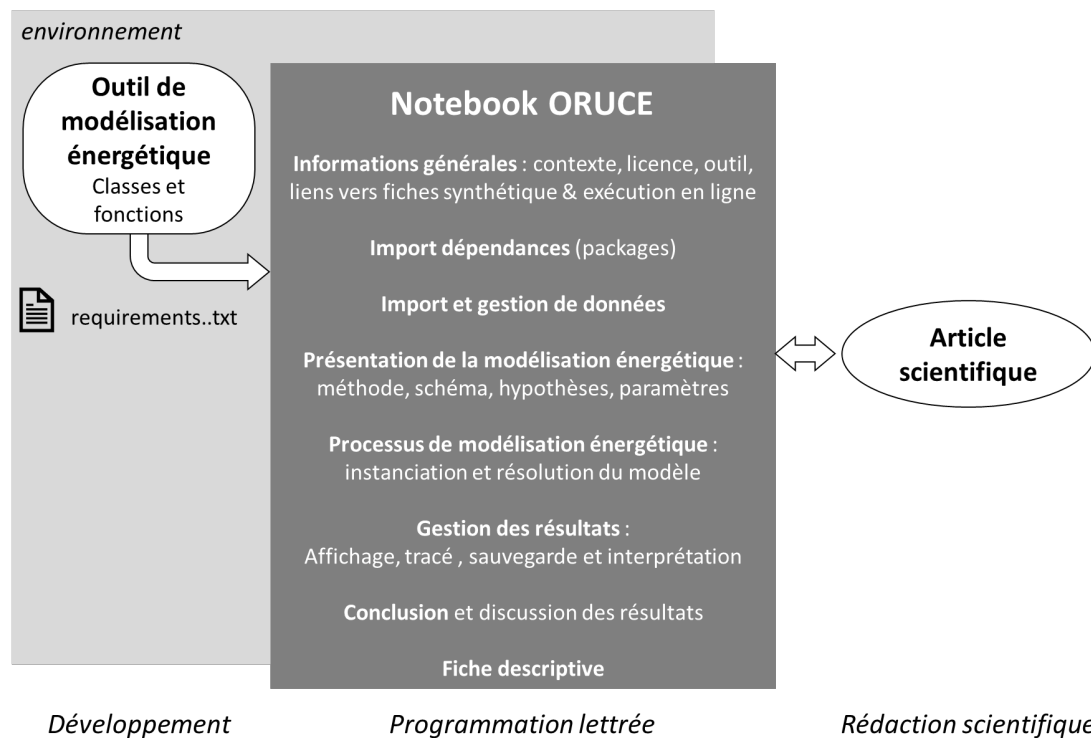


Figure III.8 : Organisation des éléments d'un notebook ORUCE et activités associées.
Source : auteur

Ce template intègre des bonnes pratiques dans l'utilisation des notebooks (section II.4.2.3), et notamment : le titre court et l'usage de cellules Markdown de contexte au début, et d'explication à la fin ; l'utilisation de code organisé en classes et testé, associés à une version des dépendances dont les imports sont situés en début de notebook. Les notebooks ORUCE sont explicatifs, et ont donc été mis en forme et réorganisés : ils ne sont pas linéaires et

¹⁶ Pad en ligne présentant le template ORUCE : https://pad.lescommuns.org/ORUCE_fr

exhaustifs par rapport aux analyses exploratoires (section II.4.2.2). Ainsi, pour conserver une trace des choix réalisés, deux bonnes pratiques sont adoptées :

- Une **trace** qualitative des choix réalisés, conservée sous forme de cellules Markdown.
- Un système de **versionnage** permettant de conserver les versions exploratoires des notebooks, si besoin via des extensions dédiées (section II.4.2.4).

Enfin, le template présente une **fiche descriptive** du cas d'étude, comprenant un ensemble de métadonnées permettant de décrire le cas d'étude de manière synthétique. Cette fiche est présentée plus en détail dans la section V.3.1.2. Ce template ne doit pas être considéré comme un modèle absolu mais constitue plutôt une proposition évolutive, dont chacun peut s'inspirer aux différentes étapes d'une étude de modélisation énergétique.

En outre, l'application de la méthode ORUCE doit rester accessible dans l'activité de modélisation énergétique :

- La mise à disposition d'un notebook avec les données et codes associés sur un cas d'étude est un premier pas accessible à toutes et tous moyennant une acculturation ;
- Le déploiement d'environnements associés aux notebooks peut faciliter la reproductibilité des résultats (section II.4.2.3), même si ces pratiques peuvent requérir des notions ou une formation en informatique sur les environnements de développements et pratiques associées pour des personnels de recherche qui y sont généralement peu formés [51,279]. C'est un pas supplémentaire sur le spectre de la reproductibilité.

La Figure III.9 reprend et précise ce spectre décrit par de Peng [265], en lien avec la méthode ORUCE.

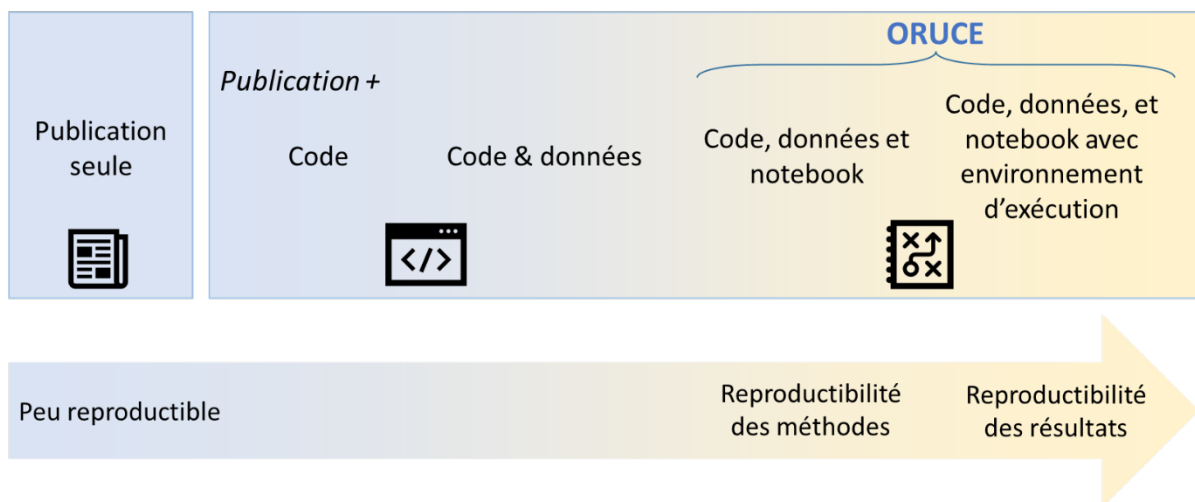


Figure III.9 : Spectre de reproductibilité appliqué à la méthode ORUCE. Source : auteur à partir de Peng [265].

III.2.5.2. Deux types d'objets ORUCE : recherche et médiation

La forme des objets supports de la méthode ORUCE va donc dépendre des publics qui la mettent en place, mais également des publics auxquels on s'adresse. Jusqu'ici, ce chapitre s'est plutôt focalisé sur les notebooks ORUCE au service de la recherche. Mais une distinction peut être faite entre 2 types d'objet ORUCE.

- **ORUCE recherche** : le cas d'étude est capitalisé dans un notebook suivant le modèle introduit dans la section III.2.5.1. Il est typiquement utilisé comme matériel supplémentaire des articles scientifiques pour de la transparence et reproductibilité. Le code peut y être détaillé dans un souci de compréhension de la modélisation énergétique avec une limite de surcharge d'information. Cet objet est conçu pour être utilisé sans assistance particulière de la part des modélisateurs. C'est l'objet qui a été le plus traité dans notre travail car il est directement lié à l'activité de recherche menée au cours de la thèse, et donc plus facilement formalisable.
 - *Exemple* : un notebook suivant le formalisme ORUCE, et présentant le processus de modélisation énergétique d'un foyer équipé de batteries et panneaux photovoltaïques en opération d'autoconsommation. Un tel notebook [F] est présenté en détail dans la section IV.3.3 comme support de travaux de recherche.
- **ORUCE médiation** : les cas d'étude suivants la méthode ORUCE peuvent également être utilisés comme objet intermédiaire à des fins pédagogiques ou de médiation¹⁷. Ces cas d'études peuvent suivre les grands principes de la méthode ORUCE à condition d'adopter un langage et un format adapté au public : du code au niveau d'abstraction proche des parties prenantes, voire l'utilisation des fonctionnalités d'interfaces des notebooks. Ces objets ne sont pas pensés comme autoportants : ce sont des supports à introduire par des échanges synchrones pour accompagner la prise en main ou adapter les fonctionnalités aux utilisateurs. Ils peuvent ensuite être utilisés pour des échanges et discussions asynchrones avec les modélisateurs sur la durée, et permettre de la coéducation et montée en compétence au sein des communautés visées. L'objet ORUCE médiation peut notamment faciliter l'appropriation des cas d'étude par le public avec la possibilité de renseigner ses propres paramètres ou données, ce qui peut rendre les contenus plus intuitifs que des rapports statiques (e.g. utiliser ses propres données de consommation et d'ensoleillement pour de l'autoconsommation PV, plutôt que de lire un rapport complet ou de se situer sur une courbe paramétrique). En outre il participe à réduire l'asymétrie des savoirs sur les cas d'études et thématiques énergétiques (section I.2.5). Cette proposition d'application de la méthode ORUCE a été utilisée dans la thèse, mais n'est pas formellement conceptualisée et éprouvée. L'Annexe 13 en présente un diagramme sur le modèle de la Figure III.1. D'autres formes sont envisageables, allant de simples courbes détaillées et interactives jusqu'à des simulateurs en ligne.
 - *Publics* : collectifs citoyens, autorités publiques et acteurs de l'énergie pour partager les choix, enrichir l'usage des modèles, et donner de la légitimité aux études par le choix des questions et valeurs [32] ; étudiant-e-s pour des enseignements.
 - *Exemple* : un notebook utilisé comme support pédagogique [H] auprès d'étudiants architectes, sur le même applicatif d'autoconsommation photovoltaïque (section IV.3.4), ou encore un notebook [I] comme objet intermédiaire auprès d'une compagnie artistique (section IV.3.5.1).

¹⁷ Par médiation on entend ici : rendre les connaissances accessibles et l'activité compréhensible dans le domaine de la modélisation énergétique. Ce en réponse à une demande sociétale, avec des démarches participatives impliquant le public et discutant les choix et valeurs [2].

Le Tableau 6 présente un bilan des caractéristiques de ces deux objets.

	ORUCE recherche	ORUCE médiation
Objectif	Transparence et reproductibilité	Pédagogie et médiation
Public	Communauté scientifique	Acteurs de l'énergie (autorités publiques, collectifs citoyens, ...), étudiant·e·s.
Autonomie de l'utilisateur ?	Oui, notamment si environnement associé	Non : demande des échanges synchrones & asynchrones
Forme	Notebook	Notebook ou autres formes
Niveau de détail	Appels directs des données et modèles énergétiques.	Explications détaillées aux différentes étapes du processus de modélisation.

Tableau 6 : Caractéristiques des objets ORUCE recherche et ORUCE médiation. Source : auteur.

III.3. Discussion et éléments de validation de la méthode ORUCE

III.3.1. Discussion et limites de la méthode ORUCE

ORUCE est une proposition de méthode ayant vocation à être évolutive et enrichie à partir de l'usage : les modèles et exemples présentés illustrent une mise en place des pratiques de modélisation énergétique ouverte, et ne sont pas pensés comme des standards à imposer. Les pratiques de modélisation énergétique ouverte présentent quelques écueils, notamment dans le monde académique (section I.2.5). La méthode ORUCE contribue notamment à résoudre les problèmes de manque de sensibilisation et de connaissances des pratiques ouvertes.

Une partie des fonctionnalités présentées dépendent des capacités des notebooks. Un certain recul doit être pris par rapport à cet objet : la technologie Jupyter Notebooks peut en effet orienter la méthode ORUCE, de la même manière que le langage Python ou plus largement l'informatique peuvent le faire. Ainsi, si cette technologie et les services associés peuvent être utilisés car il s'agit d'outils de programmation lettrée bien adaptés, ils doivent également être critiqués pour ouvrir la possibilité à des évolutions des notebooks via des contributions au projet Jupyter¹⁸, ou bien de services spécifiques comme avec la plateforme *Pangeo* pour la communauté de la géoscience [288].

Une autre limite concerne la pérennité de l'environnement et des dépendances. Les outils de conteneurs (Annexe 8) permettent de gérer ce risque, mais l'adoption de ce genre d'outil dans le domaine doit alors être facilitée et généralisée [289]. Des développements sont également en cours pour améliorer le niveau de reproductibilité des méthodes liées à l'environnement : Guix-Jupyter propose notamment une solution d'environnement en local, assurant la reproductibilité des méthodes sans recourir à des instances en ligne assez lourde pour l'usage

¹⁸ Guide des contributions Jupyter : <https://docs.jupyter.org/en/latest/contributing/content-contributor.html>

[290]. De manière générale, la méthode ORUCE reste valable même en l'absence de Jupyter Notebooks.

III.3.2. Éléments de validation : transparence, reproductibilité et accessibilité

Concernant la validation de la méthode ORUCE, elle peut être ramenée à trois thématiques :

- La **transparence**, à savoir l'ouverture du processus proposé,
- La **reproductibilité** que permet la méthode,
- La **collaboration** et l'**accessibilité** aux acteurs.

Cette validation fait face à certaines spécificités : contrairement à l'étude de méthodes d'optimisation ou de gestion de systèmes énergétiques, il sera ici difficile d'obtenir des indicateurs quantitatifs sur des telles thématiques. Des méthodologies existent et ont été appliquées pour qualifier les trois thématiques de validation, et sont détaillées ci-après.

Un premier élément de validation est l'autoévaluation basée sur des grilles de contrôle ou bonnes pratiques existantes. Même si elle est par essence biaisée et ne constitue pas une validation parfaite, l'autoévaluation est essentielle dans le domaine de la modélisation énergétique ouverte [171].

Pour la **transparence**, la *transparency checklist* de Cao et al. [94] apparaît comme un bon outil d'autoévaluation. Cette grille de contrôle est un outil qui permet aux auteurs d'études de scénarios énergétiques d'accroître le niveau de transparence de leur travail. Une autoévaluation de la méthode ORUCE avec cette grille de lecture est présentée dans le Tableau 7, avec validation en vert, et validation incomplète et commentaire en jaune.

La grille est globalement alignée avec la méthode ORUCE : la fiche descriptive du cas d'étude renseigne de nombreux éléments participant à la transparence, tels que les informations générales d'auteur, institution et financement. La méthode elle-même permet l'accès au pré-traitement et aux données de sortie, ainsi qu'aux hypothèses. La grille souligne l'importance de la prise en compte des incertitudes et facteurs incertains, qui sont simplement indiqués dans la méthode ORUCE mais ne doivent pas être négligés. La fiche descriptive permet de qualifier des éléments supplémentaires, tels que la nature et la phase d'étude ainsi que les acteurs et le terrain, ce qui participe à l'élaboration du scénario narratif. Enfin certains critères sont relatifs aux bonnes pratiques de développement et en dehors du scope de ORUCE, comme la documentation des modèles et leurs spécificités : cet aspect sera développé dans le Chapitre V.

Critère	Validation
Informations générales	
1. Auteur, institution	
2. Objectif et financement	
3. Définition de mots clefs	
Données empiriques	
4. Sources	
5. Pré-traitement	
Hypothèses	
6. Identification de facteurs incertains	<i>Seulement indiqués</i>
7. Considération de l'incertitude	<i>Seulement indiquée</i>
8. Construction du scénario narratif	<i>En partie avec acteurs, objectifs et phase d'étude</i>
9. Hypothèses sur la modification de données	
Modèle	
10. Fiche technique du modèle	
11. Propriétés spécifiques du modèle	<i>Seulement indiquées</i>
12. Interaction du modèle	<i>Seulement indiquée</i>
13. Documentation du modèle	<i>Bonnes pratiques</i>
14. Accès aux données de sortie	
15. Validation du modèle	<i>Bonnes pratiques</i>
Résultats	
16. Post-traitement	
17. Analyse de sensibilité	<i>Seulement indiquée</i>
18. Analyse de robustesse	<i>Seulement indiquée</i>
Conclusion et recommandations	
19. Relation résultats – recommandations	
20. Communication des incertitudes	

Tableau 7 : Analyse de la transparence de la méthode ORUCE basée sur la transparency checklist de Cao et al., avec validation en **vert** et validation incomplète en **jaune**.

Source : auteur basé sur Cao et al. [94]

Pour la **reproductibilité**, on qualifie ici en priorité la reproductibilité des méthodes et des résultats. L'Artifact Review and Badging [291] recommandé par Courtès et al. [292] propose un système de badges pour évaluer le niveau de reproductibilité des résultats. D'autres sources fournissent des guides et notamment DeCarolis et al. qui proposent 6 recommandations pour les concepteurs de modèles d'optimisation énergétique et économique [93], Sandve et al. donnent 10 règles de recherche computationnelle reproductible [293], Pauliuk et al. [294] et Chen et al. [295] offrent des principes clefs transposables, respectivement issus de l'écologie industrielle et de la physique des hautes énergies, ou encore Rey-Coyrehourcq et al. qui présentent des paliers d'avancement de la reproductibilité dans un contexte interdisciplinaire [296]. Ces différentes recommandations sont synthétisées dans le Tableau 8.

- La méthode ORUCE apparaît comme favorisant de nombreuses recommandations en vert, notamment facilitées par l'utilisation de notebooks.

- Certaines recommandations, en jaune, concernent des bonnes pratiques facilitées par ORUCE mais pas directement accompagnées, comme l'utilisation d'outils de versionnage, le respect de standards, ou encore le développement de tests, qui peuvent toutefois être facilités par les données archétypales. Huebner et al. fournissent d'ailleurs des bonnes pratiques supplémentaires pour la transparence, la reproductibilité et la limitation des biais dans les processus de publication scientifique, avec des outils de pré-enregistrement des études, des recommandations thématiques et des répertoires de prépublication [262].
- Enfin, en rouge on retrouve des recommandations que la méthode ORUCE ne permet pas d'assurer, notamment l'interopérabilité des modèles qui a été peu explorée avec cette méthode, et les résultats répliquables et reproductibles. Sur ce dernier point, des applications de la méthode ont permis de l'illustrer et de donner des exemples de reproductibilité (voir le Chapitre IV), mais ne constituent toutefois pas une validation : l'usage et les retours d'expériences sur la méthode sont une perspective pour développer cette validation.

Recommandation [Source]	Validation
Données	
Éviter les manipulations de données à la main [293]	
Sauvegarder l'initialisation de processus randomisés [293]	
Stocker les données des graphiques [293]	
Modèle	
Archiver les versions exactes des programmes utilisés et les dépendances [293,296]	
Utiliser un outil de versionnage pour tous les scripts [293,294]	<i>Bonnes pratiques</i>
Favoriser l'interopérabilité des modèles [93]	<i>Pas exploré</i>
Développer des tests pour les modèles avec des données ouvertes [93,294]	<i>Bonnes pratiques</i>
Fournir un environnement d'exécution [291], des tutoriels et exemples [294]	
Résultats	
Garder une trace de l'obtention des résultats, et enregistrer les résultats intermédiaires [293,295]	
Relier les explications textuelles aux résultats [291,293,294]	
Permettre l'accès à des niveaux de détails incrémentaux [293]	
Général	
Définir les objectifs et pratiques de reproductibilité dès le début du processus de recherche [295]	<i>Bonnes pratiques</i>
Utiliser l'existant, notamment les solutions ouvertes avec une large communauté [295]	<i>Bonnes pratiques</i>
Fournir l'accès public aux données, code et résultats, avec des licences associées [93,291,293–296]	
Documenter de manière transparente et adaptée [93,294–296]	
Respecter les standards de la communauté [291,295]	<i>Bonnes pratiques</i>
Fournir un document retraçant tout le processus de modélisation, par exemple un notebook [294,295]	
Résultats reproduits [291] (reproductibilité des résultats)	<i>Perspectives d'usages</i>
Résultats répliqués [291] (reproductibilité inférentielle)	<i>Perspectives d'usages</i>

Tableau 8 : Synthèse des recommandations de reproductibilité appliquée à la méthode ORUCE, avec validation en **vert**, validation incomplète en **jaune** et invalidation en **rouge**. Source : auteur

Quand bien même les cas d'étude ne seraient pas toujours reproduits, ou reproduits sans succès, la reproductibilité reste un indicateur fondamental dans la validation des résultats scientifiques [266]. Mais si la transparence et la reproductibilité participent à la qualité scientifique, elles ne la garantissent toutefois pas : un résultat reproductible peut être erroné. La reproductibilité doit être prise comme « une stratégie pour interroger les variations entre résultats plutôt qu'une manière de les valider » [263]. Par ailleurs, viser une reproductibilité parfaite peut s'avérer coûteux en temps, et tendre à diminuer l'importance de l'expertise portée par les acteurs humains par rapport aux connaissances explicites. La méthode ORUCE est basée sur la capitalisation des cas d'études, mais il est bon de se rappeler qu'une part de la connaissance sera toujours implicite et portée par les acteurs humains. L'écart par rapport à

une reproductibilité « parfaite » ne doit pas être condamné, mais plutôt assumé pour le comprendre et améliorer les pratiques de capitalisation de la connaissance tout en ayant conscience de ses limites.

Enfin concernant la collaboration, l'accessibilité (et en moindre mesure la reproductibilité), la qualification des indicateurs devient plus complexe : le « capteur » sera ici vraisemblablement l'acteur humain. Des éléments de validation basés sur une enquête centrée sur l'expérience utilisateur sont présentés dans la section V.3.2.2.b, et des illustrations de la méthode ORUCE auprès des acteurs sont également présentés dans le Chapitre IV.

III.4. Bilan et perspectives

La **méthode ORUCE** propose un processus de modélisation énergétique depuis les données d'entrée jusqu'aux résultats. Elle repose sur la capitalisation de cas d'étude comme objet intermédiaire de collaboration entre les parties prenantes.

- Apports :
 - Par rapport aux approches fermées, la méthode ORUCE permet d'aller au-delà des seuls résultats : elle replace les données et les modèles dans le contexte du cas d'utilisation, en soulignant les dépendances des résultats tout en s'appuyant sur les outils de modélisation. Elle favorise la confiance et la collaboration entre les parties prenantes, et permet d'éviter les erreurs et les biais. Les cas d'étude sont accessibles, utilisables et reproductibles pour d'éventuels travaux et analyses futurs.
 - Par rapport aux pratiques ponctuelles de modélisation énergétique ouverte, elle permet d'appliquer les bonnes pratiques de science ouverte aux différentes étapes du processus de modélisation. Elle favorise la reproductibilité dans le domaine, notamment à des échelles locales et en lien avec les acteurs impliqués.
- En entrée de la méthode on retrouve les **données archétypales**, des jeux de données ouverts provenant de sources publiques, données anonymisées ou données brutes. Elles permettent de mener à bien l'ensemble du processus de modélisation, et peuvent être réutilisées pour d'autres études.
- Le cas d'étude prend la forme d'un **notebook**, et est si possible associé à un **environnement** d'exécution pour améliorer sa reproductibilité. La forme de notebook permet de comprendre, adapter les paramètres, et comparer le cas d'étude à d'autres méthodes.
- Un exemple d'autoconsommation PV est fourni, et d'autres exemples plus complexes sont présentés dans le chapitre suivant.
- Selon le public et les objectifs visés, la méthode ORUCE peut être un **support de recherche** pour améliorer la transparence et la reproductibilité, ou un **support de médiation et de pédagogie**.
- Validation : la méthode est principalement auto-évaluée, sur des critères de :
 - **Transparence** : la méthode est globalement validée, avec des efforts sur les bonnes pratiques et qualification des incertitudes.
 - **Reproductibilité** : de même, la méthode est globalement validée avec des efforts sur les bonnes pratiques et des retours d'expérience nécessaires, en gardant en tête les limites intrinsèques associées à cet indicateur.
 - **Collaboration et accessibilité** : la validation nécessite ici des retours d'expériences et une réflexion de fond sur les indicateurs en perspective.

La mise à disposition de ces bonnes pratiques dans le domaine, ainsi que la proposition d'exemples d'application est un pas en avant pour faire de la science ouverte la norme dans le génie énergétique. Au-delà des premières réglementations sur la science ouverte, ces pratiques

peuvent permettre de profiter des avantages de l'ouverture et de la reproductibilité pour des collaborations pertinentes et utiles.

Les perspectives pour cette méthode sont multiples :

- D'abord affiner la validation : avec des retours d'expérience d'usage, explorer des indicateurs quantitatifs (e.g. nombre de personnes qui consultent, qui exécutent, qui adaptent un notebook, ...) et qualitatifs (e.g. capacité à débattre, comprendre, s'approprier, mutualiser, ...) pouvant notamment se reposer sur la notion d'effectivité, i.e. la capacité à être valide et efficace dans certains contextes [137]. Si ces critères sont complexes à évaluer [51], on peut s'appuyer sur des méthodes et critères émergents, telles que les méthodes objectives et subjectives d'évaluation de l'utilisabilité comme introduites par Berendes et al [114], ou les critères de valorisation formalisés par le cabinet de conseil Inno³ pour le CNES [297].
- Ensuite, la question de l'objet et de l'environnement associé à la méthode devra suivre les développements des outils dédiés ainsi que des ontologies en développement, en gardant en ligne de mire l'accessibilité pour les utilisateurs cibles et la reproductibilité à long terme.
- La méthode ORUCE appliquée à la médiation doit également être développée et conceptualisée, en explorant par exemple le format le plus adapté, les jeux d'acteurs et organisations, ou encore le compromis entre transparence et respect de la vie privée. Une entrée pour développer cet objet peut par exemple être la notion de scénario au sens de Godjo et al. [238], où le cas d'étude comprendrait des éléments supplémentaires tels qu'une description narrative pour réellement jouer un rôle de terrain de rencontre pour le partage des connaissances entre acteurs.
- Enfin, puisque la méthode présente des bonnes pratiques d'ouverture et de reproductibilité pour un cas d'étude, on peut espérer que des plus en plus d'études énergétiques soient mises à disposition ouvertement. Or la méthode ne présente pas de solutions de mise à disposition d'une bibliothèque entière de cas d'études auprès d'utilisateurs pouvant aussi bien être des académiques que des collectifs ou autorités publiques. Le Chapitre V explore cette problématique, en proposant un concept de plateforme de modélisation énergétique ouverte.

Chapitre IV

Ouverture et collaboration dans la conception de projets de transition énergétique locaux

*« Moi je vous dis que c'est ce que vous donnez qui vous fait riche »
Que ma joie demeure, Jean Giono*

SOMMAIRE

Chapitre IV	Ouverture et collaboration dans la conception de projets de transition énergétique locaux	104
	Résumé du chapitre.....	105
IV.1.	Thématiques et cas d'études	106
IV.2.	Ouverture d'un processus de modélisation énergétique en phase d'esquisse de conception : projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI	106
IV.2.1.	Chaleur fatale : définition et enjeux	106
IV.2.2.	Le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI : infrastructure de recherche et cas d'étude ouverts	107
IV.2.3.	Application de la méthode ORUCE à un projet de valorisation de chaleur fatale	109
IV.2.4.	Gestion des données pour le projet de valorisation de chaleur fatale LNCMI	111
IV.2.5.	Développement de modèles énergétiques ouverts.....	112
IV.2.6.	Deux formes d'application de la méthode ORUCE au LNCMI.....	113
IV.2.6.1.	Cas d'étude de valorisation de chaleur fatale : un objet de recherche ouvert pour se rapprocher des problématiques du terrain LNCMI	113
IV.2.6.1.a.	Contexte du cas d'étude de recherche LNCMI	113
IV.2.6.1.b.	Scénarios, données et méthode du cas d'étude.....	114
IV.2.6.1.c.	Présentation des modèles énergétiques et de la procédure de planification.....	116
IV.2.6.1.d.	Résultats énergétiques et exergétiques de la replanification	118
IV.2.6.1.e.	Conclusion et discussion	122
IV.2.6.2.	Cas d'étude ORUCE comme objet de médiation auprès du LNCMI.....	124
IV.2.7.	Le LNCMI : une infrastructure de recherche ouverte	125

IV.3. Processus de modélisation énergétique ouvert au service de la recherche et de la médiation auprès des communautés énergétiques : le cas de l'autoconsommation photovoltaïque.....	127
IV.3.1. Autoconsommation photovoltaïque : définition et enjeux.....	127
IV.3.1.1. Généralités sur l'autoconsommation.....	127
IV.3.1.2. Impact environnemental des systèmes d'autoconsommation.....	127
IV.3.1.3. La place des communautés énergétiques.....	128
IV.3.1.4. Sobriété énergétique au sein des communautés.....	128
IV.3.2. ORUCE appliquée à l'autoconsommation photovoltaïque.....	130
IV.3.3. Cas d'étude autour de l'autoconsommation face aux enjeux de transition dans la recherche.....	130
IV.3.3.1. Informations générales.....	130
IV.3.3.2. Gestion des données.....	130
IV.3.3.3. Présentation du modèle énergétique.....	132
IV.3.3.4. Gestion des résultats.....	135
IV.3.3.5. Conclusion et discussion.....	138
IV.3.4. Le cas d'étude ORUCE pour l'autoconsommation : un objet pédagogique	139
IV.3.5. ORUCE comme support de médiation auprès de collectifs citoyens.....	142
IV.3.5.1. Exploration de scénarios pour l'autonomie énergétique d'un système embarqué : le spectacle ONIRI 2070.....	142
IV.3.5.2. Lien aux collectifs citoyens sur la question de l'autoconsommation.....	144

Résumé du chapitre

Ce chapitre présente un panel de cas d'étude de modélisation énergétique ouverte, appliquées aux thématiques de la valorisation de chaleur fatale, et à l'autoconsommation d'électricité photovoltaïque. Ces enjeux et le contexte associé y sont introduits, avant de développer les cas d'étude qui illustrent la méthode ORUCE orientés autour de la recherche et autour de la médiation pour de la pédagogie ou le contact aux acteurs de terrain. Ces études soulignent les avantages de l'application de la méthode ORUCE, notamment en termes de compréhension, adaptation et comparaison du processus modélisation énergétique, mais également certaines limites et perspectives de la méthode.

IV.1. Thématiques et cas d'études

Le chapitre précédent introduisait la méthode ORUCE, avec en son centre le cas d'étude comme objet de capitalisation des connaissances et de collaboration entre acteurs de l'énergie. Ce chapitre présente des ouvertures de processus de modélisation sur des enjeux prégnants de la transition énergétique, pour laquelle émerge un besoin fort d'une approche de science ouverte à destination des acteurs académiques et de nouveaux acteurs socio-politiques (e.g. les collectivités, les gestionnaires de réseau locaux, ou encore les exploitants de site et consommateurs finaux, pouvant devenir producteurs locaux d'énergie).

En premier lieu avec le projet local de valorisation de chaleur fatale du LNCMI, au contact des autorités locales, gestionnaire de réseau énergétique et chercheurs. Ensuite avec l'autoconsommation photovoltaïque, combinant liens aux enjeux sur la transition énergétique dans la recherche, et support d'enseignement et de médiation. Les cas d'études associés aux deux thématiques ont été traités durant la thèse, donnant lieu à des travaux de recherche et de médiation. En outre, ils permettent également de sortir de l'abstraction et d'illustrer la méthode ORUCE dans la variété de formes et d'objectifs qu'elle peut prendre.

Dans les deux cas, les thématiques générales (i.e. chaleur fatale et autoconsommation) sont introduites, avant de présenter puis de discuter les processus de modélisation énergétique ouverts et des formes de la méthode ORUCE mis en place.

IV.2. Ouverture d'un processus de modélisation énergétique en phase d'esquisse de conception : projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI

IV.2.1. Chaleur fatale : définition et enjeux

La lutte contre le dérèglement climatique nous impose de réduire les émissions de GES liées à notre consommation d'énergie. La chaleur en particulier est l'usage énergétique le plus important, puisqu'elle représentait près de la moitié de la consommation d'énergie finale dans le monde en 2021 [298]. 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 (en anglais *waste heat* ou *excess heat*) est définie comme de la chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas utilisée dans le processus : elle se distingue en cela de la cogénération [299,300]. Le gisement de chaleur fatale issue de sources industrielles en France représente à lui seul près de 110 TWh chaque année [300], à mettre en regard de la consommation d'énergie finale française de 1562 TWh au total en 2020 [301]. Au gisement industriel viennent s'ajouter d'autres gisements tels que les stations d'épuration, les usines d'incinération d'ordures ménagères ou encore les data centers. En plus de sa contribution à la lutte contre le réchauffement climatique, la récupération de chaleur fatale comporte d'autres avantages comme l'indépendance énergétique ou le développement d'une industrie pérenne. Mais 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 [300,302] :

- Sa localisation puisque les gisements de chaleur fatale sont souvent diffus sur un territoire et pas nécessairement proches des lieux de consommation de chaleur, alors même que ce vecteur énergétique se transporte mal,
- Sa pérennité face aux durées de vie des infrastructures de récupération et des réseaux de chaleur.
- Son niveau de température qui, dont la facilité d'exploitation directe ou bien d'injection sur les réseaux de chaleur va directement dépendre.

A ces problématiques techniques peuvent s'ajouter des freins institutionnels et commerciaux [303].

IV.2.2. Le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI : infrastructure de recherche et cas d'étude ouverts

Le LNCMI-Grenoble (Laboratoire National de Champ Magnétique Intense) met à disposition des chercheurs et ingénieurs du monde entier des champs magnétiques intenses. Situé dans le quartier de la Presqu'Île (Figure IV.1), c'est une des installations électro-intensive du CNRS caractérisée par une consommation énergétique de 15 GWh en 2018 pour 24 MW de puissance installée. Le champ magnétique produit par les électroaimants n'étant pas converti en travail mécanique, 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). Le rapport entre la consommation électrique des aimants seuls (i.e. la dissipation de chaleur) et la consommation électrique de l'installation peut atteindre est en moyenne de 85%, le reste de la consommation électrique correspondant principalement à la consommation des pompes hydrauliques. L'eau de refroidissement en sortie des aimants a une température variable entre 10°C et 40°C, variant notamment selon le niveau de puissance des aimants et la température du Drac.



Figure IV.1 : 1. Un aimant de champ intense dans son enceinte 2. Bobine pour champ intense 3. Le LNCMI dans le quartier de la Presqu'Île à Grenoble. Source : auteur à partir d'image du LNCMI et de la ©Ville de Grenoble. Tous droits réservés.

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 (environ 20 GWh/an), 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 9.

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

Tableau 9 : 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 (PAC) et d'un stockage thermique pour le système de valorisation [304] (Figure IV.2).

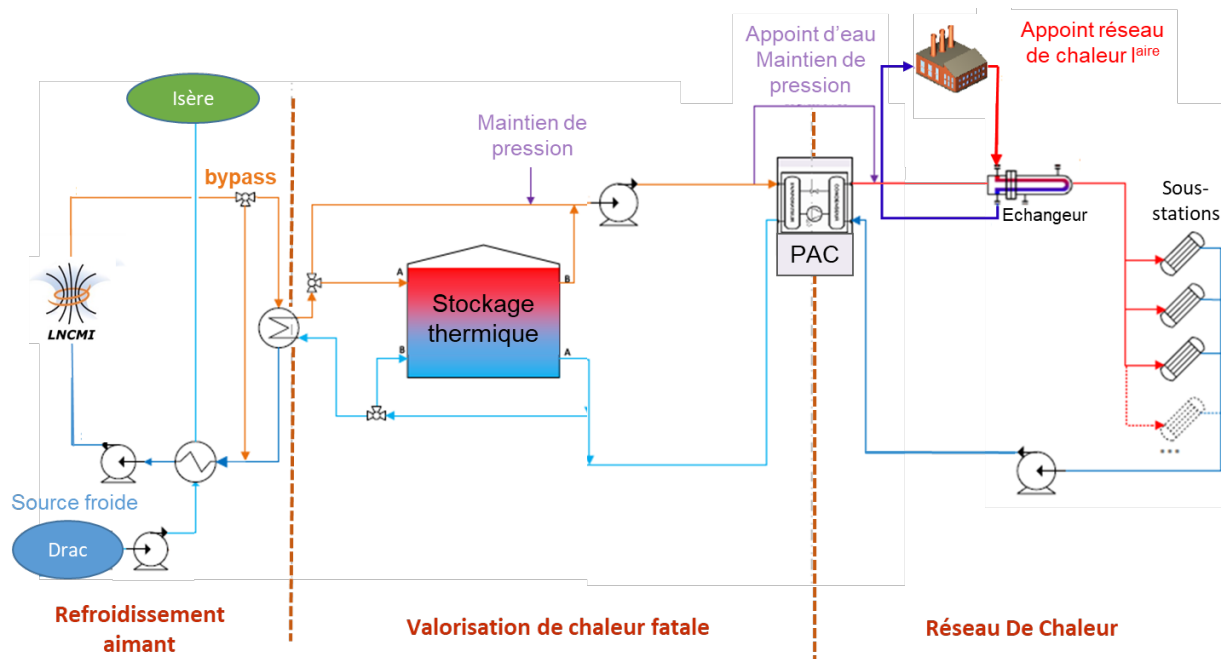


Figure IV.2 : Schéma hydraulique du dispositif de valorisation de chaleur fatale du LNCMI.
 Source : auteur à partir de CCIAG, tous droits réservés.

Le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI comporte différents intérêts :

- La valorisation des calories pour alimenter le réseau de chaleur, favorisant la transition et l'indépendance énergétique du territoire.
- L'accès à une seconde source froide pour le refroidissement des aimants.
- L'évolution de l'installation du LNCMI pour les aimants du futur et leur pérennité.
- L'ancrage du laboratoire dans son territoire avec la récupération d'une énergie perdue pour la consommation locale du quartier et de ses habitants.

IV.2.3. Application de la méthode ORUCE à un projet de valorisation de chaleur fatale

La valorisation de chaleur fatale constitue ainsi un sujet phare de la transition énergétique, dont les contraintes constituent autant de défis pour la recherche. Le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI en particulier, incarne plusieurs de ces défis (Tableau 9) :

- La gestion des différences de puissance et de temporalités entre le gisement de chaleur fatale et la consommation sur le réseau (ici résidentielle collective ou tertiaire),
- L'injection d'un gisement basse température vers un réseau de chaleur « moyenne température », ce qui est représentatif de la grande majorité du potentiel en France où 50% des gisements de chaleur fatale sont en dessous de 100°C (Figure IV.3), et plus de 90% des réseaux de chaleur ont des températures d'opération supérieures à 85°C (Figure IV.4).
- Un projet multi-acteur, notamment avec l'implication d'un acteur de la recherche et son infrastructure (LNCMI-Grenoble), une collectivité (Grenoble Alpes Métropole – GAM), et son délégataire de service public l'opérateur du réseau de chaleur (la Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise - CCIAG). 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 [302].

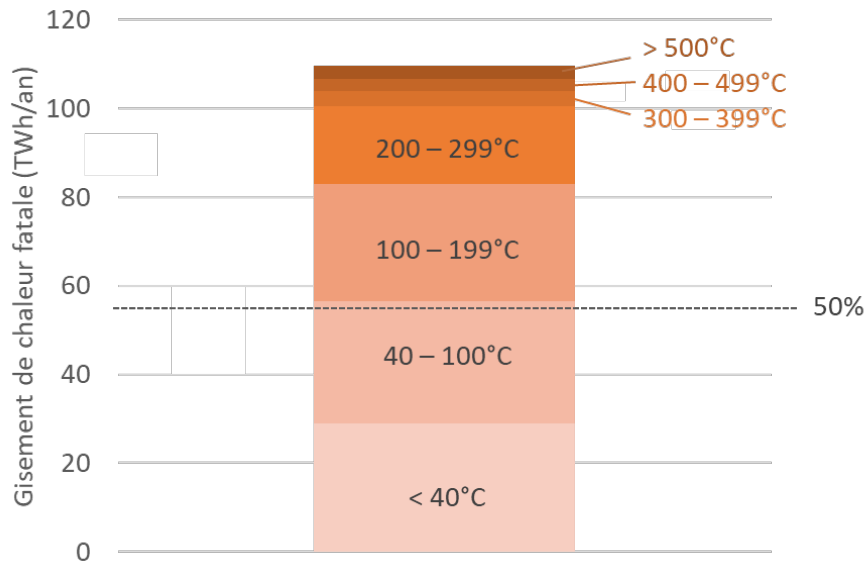


Figure IV.3 : Gisement de chaleur fatale industrielle en France par niveaux de températures. Source : auteur à partir de données ADEME [300]

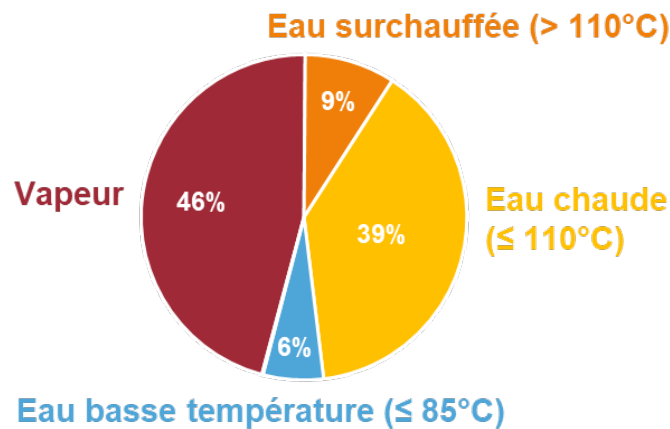


Figure IV.4 : Niveaux de température des réseaux de chaleur en France (pourcentages d'énergie livrée). Source : auteur à partir de données FEDENE [305]

Le LNCMI étant un grand instrument de recherche publique, ses données et son fonctionnement peuvent être utilisés comme un cas d'étude représentatif et ouvert pour la valorisation de la chaleur fatale des processus industriels électro-intensifs.

L'application de la méthode ORUCE est donc particulièrement pertinente et illustrative sur ce projet réel de conception en phase d'esquisse au contact des acteurs. Elle s'incarne aux différentes étapes du processus de modélisation énergétique, comme détaillé dans la Figure IV.5. Les sections suivantes détaillent les démarches d'ouverture concrètes aux différentes étapes du processus de modélisation, et les leçons qui en sont tirées. En particulier, deux formes d'application de la méthode ORUCE sont présentées section IV.2.6 :

- Un cas d'étude de recherche ouvert se rapprochant des problématiques du terrain,

- Un support de médiation auprès des acteurs du projet.

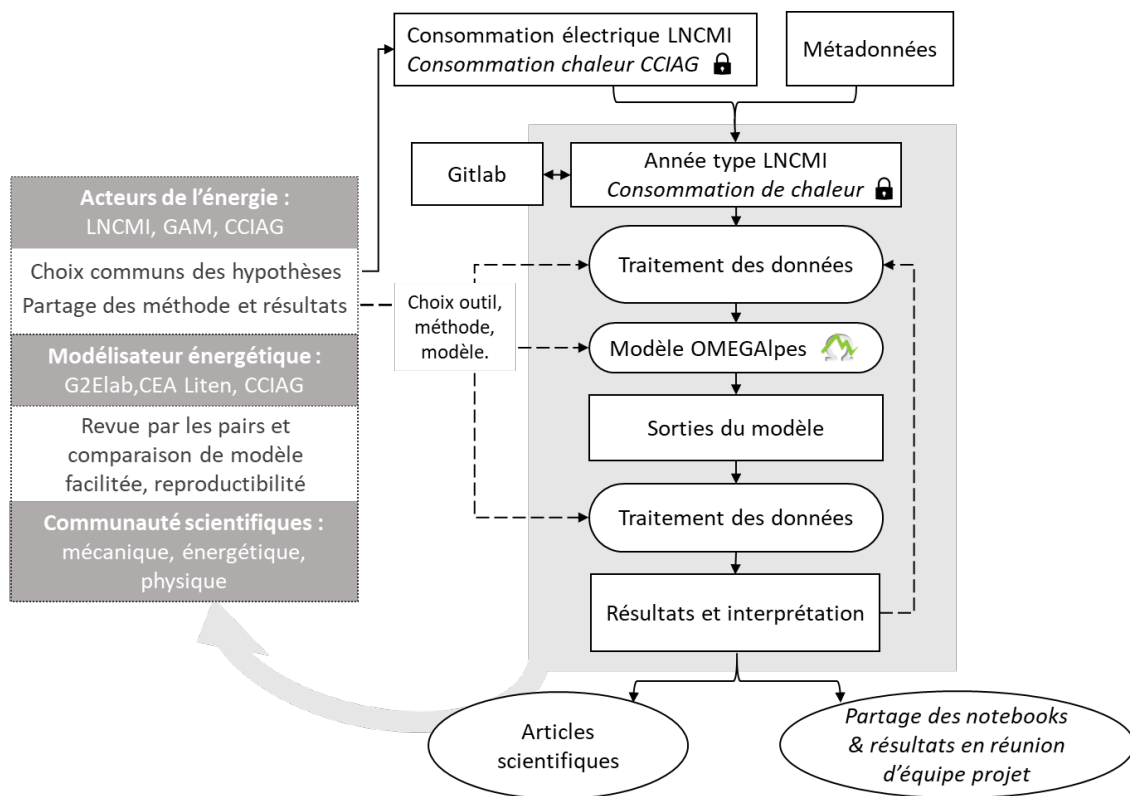


Figure IV.5 : Méthode ORUCE appliquée au projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI.
Source : auteur

IV.2.4. Gestion des données pour le projet de valorisation de chaleur fatale LNCMI

Sur le cas LNCMI, une partie des jeux de données bruts ne sont pas partageables ouvertement :

- Les données du LNCMI peuvent être différenciées en deux catégories (voir la note stratégique sur l'open data au LNCMI rédigée dans le cadre des travaux de thèse en Annexe 14) :
 - Les données expérimentales du LNCMI qui incluent le champ magnétique appliqué, voire les conditions expérimentales comme la température, pression, matériel utilisé, etc., dont la politique de gestion est en cours d'évolution au sein du LNCMI et plus généralement des infrastructures de recherche européennes avec le projet ISABEL [306].
 - Les données énergétiques du LNCMI qui n'incluent que les points de consommation du LNCMI en termes de puissance électrique, avec d'une part les données temps réel de consommations telles que relevées par RTE, et d'autre part les données « année modèle » de consommation électrique du LNCMI, utilisées pour le projet de valorisation de chaleur fatale. Ces données sont reconstruites à partir de données de consommation réelles pour être représentatives du fonctionnement, et partagées en open data. Elles peuvent être considérées comme un jeu de données archétypales comme définies dans la section III.2.4.2.
- Les données de consommation du réseau de chaleur sont des données détenues par l'opérateur du réseau de chaleur et délégataire de ce service public auprès de Grenoble

Alpes Métropole : la CCIAG. Les données sont ainsi partagées avec l'équipe projet mais pas mise à disposition ouvertement, pour des enjeux de confidentialité par rapport aux consommateurs, et de protection de données pouvant être exploitées dans le contexte concurrentiel de fourniture d'énergie.

En somme, la gestion des données sur le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI a permis de :

- **clarifier le statut des données** des acteurs,
- d'accompagner une **stratégie d'ouverture des données** lorsque c'était possible,
- et de **fournir des données archétypales** de consommation électrique.

In fine, ce sont d'une part l'année type de consommation électrique du LNCMI, et d'autre part les relevés de consommation du réseau de chaleur sur la boucle locale du quartier, qui seront utilisées pour paramétrer les modèles énergétiques utilisés.

IV.2.5. Développement de modèles énergétiques ouverts

De nombreuses études ont été menées sur le cas d'étude de valorisation de chaleur fatale du LNCMI :

En amont de mes travaux

- Planification des expériences du laboratoire sous contraintes environnementales, économiques et sociales [307].
- Étude de la flexibilité des profils de consommation du LNCMI à partir de l'identification d'expériences types [308].
- Optimisation multi-acteurs appliquée au projet de récupération de chaleur fatale du LNCMI [309].

Lors de mes travaux, avec la modélisation énergétique, économique, environnementale, et l'ouverture des études au LNCMI

- Étude de l'influence de la thermo-hydraulique du système de refroidissement des électro-aimants du LNCMI sur le bilan économique et environnemental du LNCMI [304].
- Optimisation basée sur des critères énergétiques et exergetiques [253,254].
- Développement de la science ouverte sur le cas d'étude du LNCMI [310].

Ces études successives ont permis le **développement et la capitalisation dans un outil Open Source**, OMEGAlpes, en parallèle de l'avancement du projet de valorisation de chaleur fatale. Ont notamment été développés :

- Les aspects multi-vecteurs,
- L'enrichissement de la bibliothèque énergétique, avec les classes de pompe à chaleur ou de profils décalables dans le temps, et les paramètres de cycles de charge implémentées pour le stockage,
- Le développement d'une bibliothèque de modélisation centrée sur les acteurs,
- La création d'une classe propre pour les calculs exergetiques.

Un bilan des codes et notebooks développés dans ce cadre est présenté dans le tableau 6 de l'article « OMEGAlpes, an Open-Source Optimisation Model Generation Tool to Support

Energy Stakeholders at District Scale » publié dans le journal *energies* [188], également disponible en Annexe 15.

IV.2.6. Deux formes d'application de la méthode ORUCE au LNCMI

IV.2.6.1. *Cas d'étude de valorisation de chaleur fatale : un objet de recherche ouvert pour se rapprocher des problématiques du terrain LNCMI*

IV.2.6.1.a. *Contexte du cas d'étude de recherche LNCMI*

Sur le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI, la méthode ORUCE a pu être expérimentée dans ses deux formes : recherche et médiation. Nous détaillons ici un travail de recherche [255], où l'objectif de l'étude est de rapprocher les modèles de la planification énergétique concrète du laboratoire. L'objectif dans cette section est de **détailler le processus de modélisation énergétique sur un cas d'étude de recherche**, sur un cas d'étude autour de la valorisation de chaleur fatale. Le processus de modélisation présenté ci-après est donc mis à disposition dans un notebook selon les principes de la méthode ORUCE [D]. Après avoir détaillé la méthode et les résultats, l'apport de la méthode ORUCE sera discuté.

Ce cas d'étude répond à un nouveau contexte au LNCMI par rapport aux études précédentes :

- Un nouveau contrat électrique,
- Une meilleure gestion de la température de sortie d'aimant,
- Une gestion réaliste du planning des expériences dans la modélisation énergétique.

La planification des expériences du LNCMI est réalisée chaque semestre, sur la base de la consommation d'énergie des expériences hebdomadaires parmi d'autres considérations scientifiques ou techniques. Ainsi, l'utilisation du modèle d'optimisation avec la consommation d'énergie hebdomadaire à partir de données historiques sur une base semestrielle apparaît comme pertinente pour étudier la flexibilité de la planification des expériences. Concernant la température du système de refroidissement, un système de régulation doit être mis en place afin d'assurer une température de sortie d'aimant constante pour que le stockage et la pompe à chaleur fonctionnent correctement. Les premières études et tests réalisés dans le LNCMI ont montré qu'une température constante de 35°C peut être maintenue sans risque d'endommager les aimants, pour des valeurs de consommation électrique supérieures à 10 MW. Actuellement, les aimants sont sur-refroidis et une grande partie de la chaleur dissipée dans les aimants à une température inférieure à 35°C. Le maintien d'une température constante à 35°C en sortie des aimants entraîne alors une forte augmentation de la destruction d'exergie. Enfin, l'électricité consommée pour la production du champ magnétique élevé est désormais achetée à un prix presque constant, quelle que soit l'heure de la journée ou la période de l'année (sauf pendant les jours de pointe exceptionnels indiqués par le gestionnaire du réseau de transport français RTE). Cela n'est pas sans conséquences : la flexibilité du planning expérimental qui était auparavant pleinement exploitée pour économiser les coûts d'électricité est désormais beaucoup moins contrainte. Elle permet aux chercheurs de travailler le jour plutôt que la nuit, et donne plus de flexibilité pour l'objectif de récupération de la chaleur fatale. Cela remet en cause les performances calculées dans les études précédentes, et notamment le dimensionnement du stockage.

L'objectif dans ce cas d'étude est de proposer des stratégies de flexibilité afin d'améliorer les performances énergétiques et exergetiques des opérations de récupération de chaleur fatale. L'étude se concentre sur le cas concret du LNCMI, et explore deux stratégies de flexibilité :

1. Une planification semestrielle des expériences à partir de l'historique hebdomadaire de la consommation d'énergie, afin d'**améliorer les résultats énergétiques**.
2. Une stratégie de gestion de la température qui adapte la température de sortie de l'aimant aux occurrences de récupération de chaleur fatale, afin de **minimiser la destruction d'exergie**.

IV.2.6.1.b. Scénarios, données et méthode du cas d'étude

Des scénarios de flexibilité pour le LNCMI qui permettront d'évaluer ces stratégies sont présentés dans le Tableau 10.

Scenario	Calendrier LNCMI	Gestion de la température	Capacité de stockage
REF	Classique	Surrefroidi	Pas de stockage
REC-XX	Classique	35 °C	0 MWh à 40 MWh
FLEXENER-XX	Réarrangé (Pas de temps de 168h)	35 °C	0 MWh à 40 MWh
FLEXTEMP-XX	Classique	35 °C or surrefroidi	0 MWh à 40 MWh
DOUBLEFLEX-XX	Réarrangé (Pas de temps de 168h)	35 °C or surrefroidi	0 MWh à 40 MWh

Tableau 10 : Scénarios de valorisation de chaleur fatale modélisés dans l'étude pour le LNCMI

Le scénario nommé "REF" correspond au scénario de référence. Dans ce scénario, il n'y a pas du tout de récupération de chaleur, donc pas de pompe à chaleur ni de stockage thermique. Ce scénario correspond à la situation actuelle du quartier de la Presqu'Île. Le scénario nommé "REC" considère la récupération de chaleur simple, c'est en quelque sorte un deuxième scénario de référence. L'effet des nouvelles stratégies de flexibilité a été comparé à ce scénario afin d'évaluer la pertinence des stratégies de flexibilité. Le scénario nommé "FLEXENER" place les expériences dans le calendrier afin d'adapter leur consommation d'énergie aux besoins thermiques du quartier. Le scénario nommé "FLEXTEMP" ajuste la température de sortie d'aimants : lorsque la chaleur fatale doit être valorisée, sa température est réglée à 35 °C. Lorsqu'elle doit être dissipée, la température est ajustée à la valeur surrefroidie. Le scénario nommé "DOUBLEFLEX" applique les deux stratégies précédentes en même temps. Chaque scénario a été étudié avec différentes capacités de stockage thermique, allant de 0 MWh à 40 MWh par incréments de 10 MWh. Cela a conduit à des sous-scénarios, distingués par le suffixe "-XX" à la fin du nom du scénario.

La Figure IV.6 présente une monotone de la puissance consommée au LNCMI (i.e. les données horaires de puissance classées par ordre croissant sur une année), où on peut distinguer différentes aires :

- *Chaleur fatale théorique (A1+A2+A3)* : consommation électrique des aimants, entièrement dissipée sous forme de chaleur.

- *Chaleur fatale disponible (A1+A3)* : chaleur fatale pour les valeurs de puissance supérieures à la valeur de puissance seuil de 8,5 MW $P_{min\ rec}$ afin de garantir une température constante.
- *Chaleur fatale récupérable (A1)* : chaleur fatale disponible plafonnée par la puissance maximale du système de récupération de chaleur $P_{STO+PAC}$. Cette valeur dépend donc du dimensionnement du stockage et de la PAC. Sur la Figure IV.6, un stockage d'une capacité de 20 MWh est considéré.

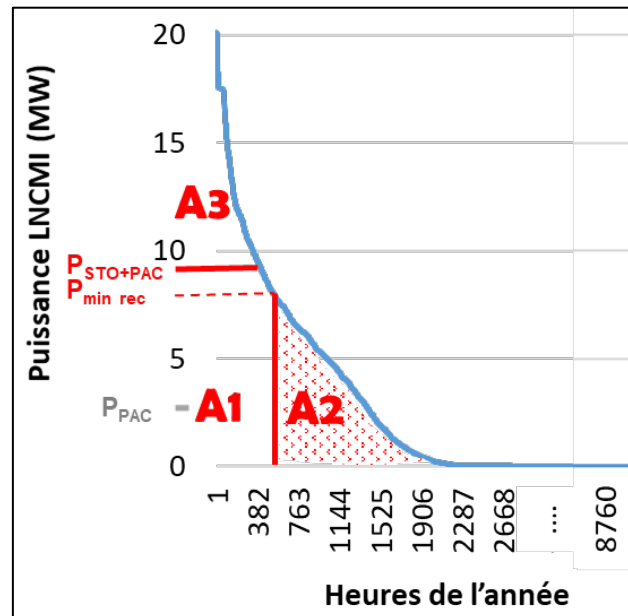


Figure IV.6 : Monotone des consommations électriques des aimants du LNCMI, avec $A1+A2+A3$ la chaleur fatale théorique, $A1+A3$ la chaleur fatale disponible et $A1$ la chaleur fatale récupérable.
Source : auteur.

Il existe également un *potentiel technique* et un *potentiel économique* de chaleur fatale [311]. Le potentiel technique correspond à la part de la chaleur fatale récupérable qui peut être valorisée pour couvrir une consommation de chaleur. Le calcul de ce potentiel dépend de la synchronicité et des niveaux de puissance entre la dissipation de chaleur fatale et la consommation du réseau de chaleur, en plus des contraintes de remplissage du stockage et de température de la PAC. Ce potentiel technique correspond au résultat recherché pour les calculs énergétiques de cette section. Le potentiel économique fait référence à la viabilité économique du système de valorisation déployé, il n'est pas exploré ici.

La Figure IV.7 présente les valeurs à l'échelle de ces différents potentiels de valorisation de chaleur fatale pour le projet du LNCMI, avec la chaleur fatale récupérable dépendante du dimensionnement du stockage. Concernant la chaleur fatale récupérable, on peut noter que le temps de charge et de décharge du stockage est de 3 heures et qu'une fois le stockage complètement chargé, seule la PAC à sa puissance maximale (P_{PAC}) pourra être mobilisée pour la valorisation. Les valeurs présentées correspondent donc à une chaleur fatale récupérable « idéale », la valeur réelle se situant entre celle-ci et le cas sans stockage. Cette dynamique de stockage n'est pas prise en compte dans le calcul de la chaleur fatale récupérable, mais le sera dans le calcul des résultats de cette section.

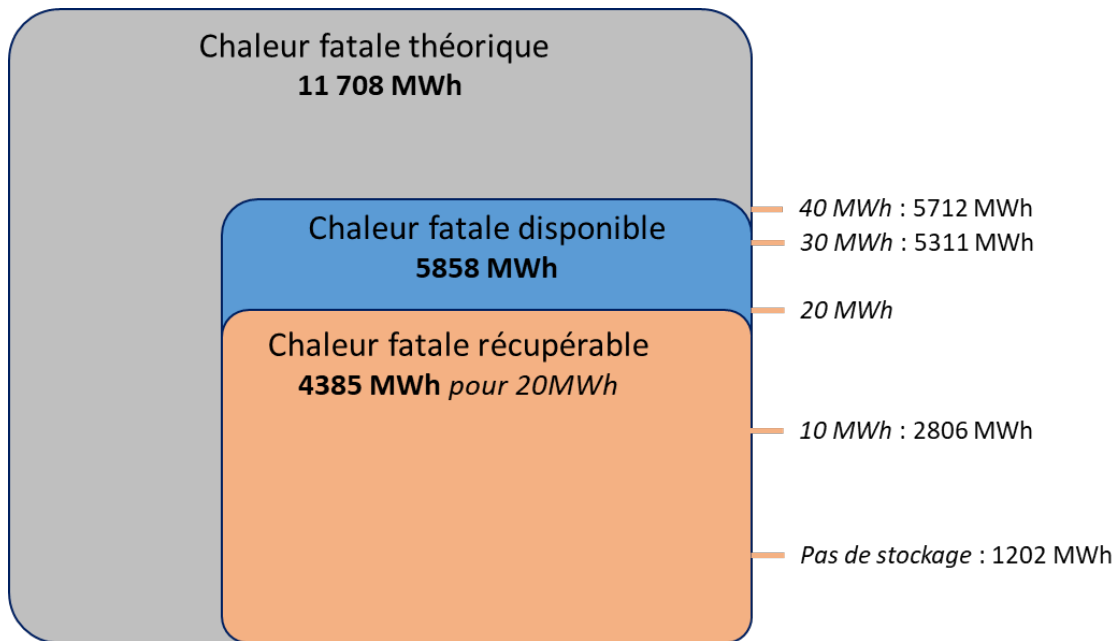


Figure IV.7 : Valeurs des différents potentiels de chaleur fatale pour le projet du LNCMI. Source : auteur.

IV.2.6.1.c. Présentation des modèles énergétiques et de la procédure de planification

Comme précisé plus tôt, une campagne typique d'expériences au LNCMI prend une semaine entière. Par conséquent, un pas de temps de 168 heures a été utilisé pour le réarrangement du calendrier. Cependant, le profil annuel de la consommation d'énergie du LNCMI est défini à un pas de temps d'une heure. Ainsi, la reprogrammation du calendrier implique de reconstruire le profil énergétique. Des dictionnaires ont été construits afin de basculer entre les profils d'énergie, de puissance et de température, et deux modèles OMEGAAlpes ont été développés et utilisés.

Tout d'abord, un modèle simplifié du projet de valorisation de la chaleur fatale est utilisé afin de réorganiser les blocs énergétiques de 7 jours en fonction du profil de consommation du réseau de chaleur (Figure IV.8). Le stockage n'est pas explicitement considéré puisque le pas de temps est de 168 heures. La valeur de puissance seuil pour la récupération de la chaleur fatale ainsi que les capacités de puissance maximale du stockage et de la pompe à chaleur sont prises en compte dans la gestion des données d'entrée, afin de déterminer la chaleur fatale récupérable. La consommation fixe de chauffage urbain est également une donnée d'entrée (Figure IV.9). L'optimisation comprend ici deux objectifs :

1. Maximiser la chaleur fatale récupérée, c'est-à-dire minimiser la production de chaleur du réseau de chauffage urbain.
2. Minimiser la différence entre l'énergie consommée sur le réseau de chaleur et en sortie de la pompe à chaleur à chaque pas de temps, et pondérée par la valeur de consommation sur le réseau. Cet objectif permet d'ordonner les blocs de consommation et de production à des niveaux proches relativement sur toute la période d'étude. Cet objectif est décrit ci-après, avec E_{RDC} l'énergie consommée sur le réseau de chaleur, et E_{PAC} l'énergie en sortie de pompe à chaleur. $fitting_{objective} = \sum_{t=1}^{52} (E_{RDC}[t] - E_{PAC}[t]) * E_{RDC}[t]$ (2)

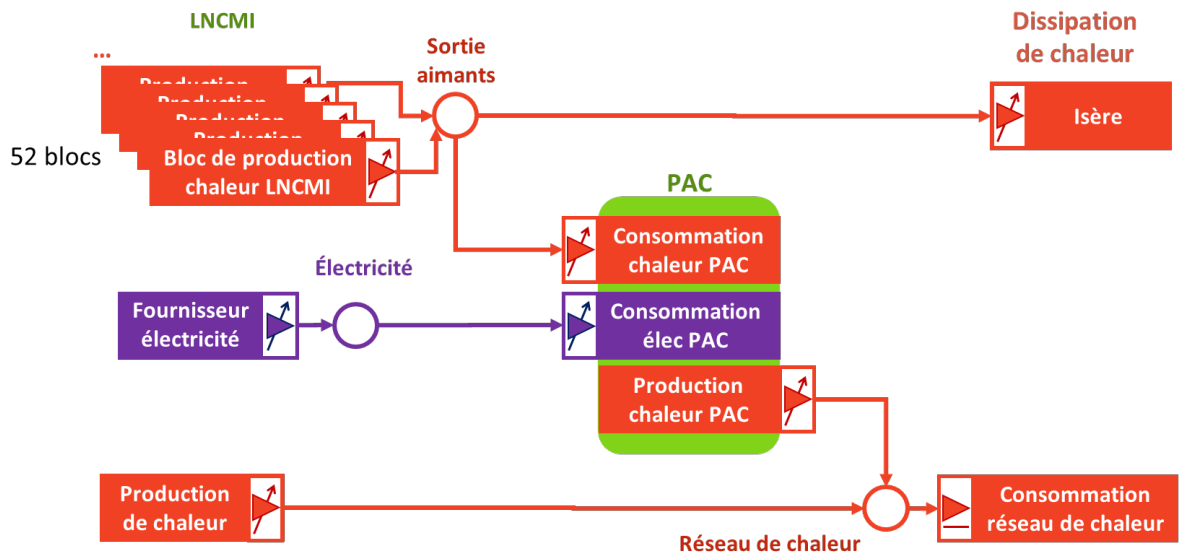


Figure IV.8 : Diagramme du modèle simplifié OMEGAlpes pour le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI. Source : auteur

Une fois les blocs énergétiques du LNCMI réarrangés, les dictionnaires permettent de reconstruire les profils de puissance au pas de temps horaire. Les profils de température sont également reconstruits avec leur profil d'origine ou des valeurs constantes de 35°C selon l'occurrence de la récupération, en suivant la stratégie 'FLEXTEMP'.

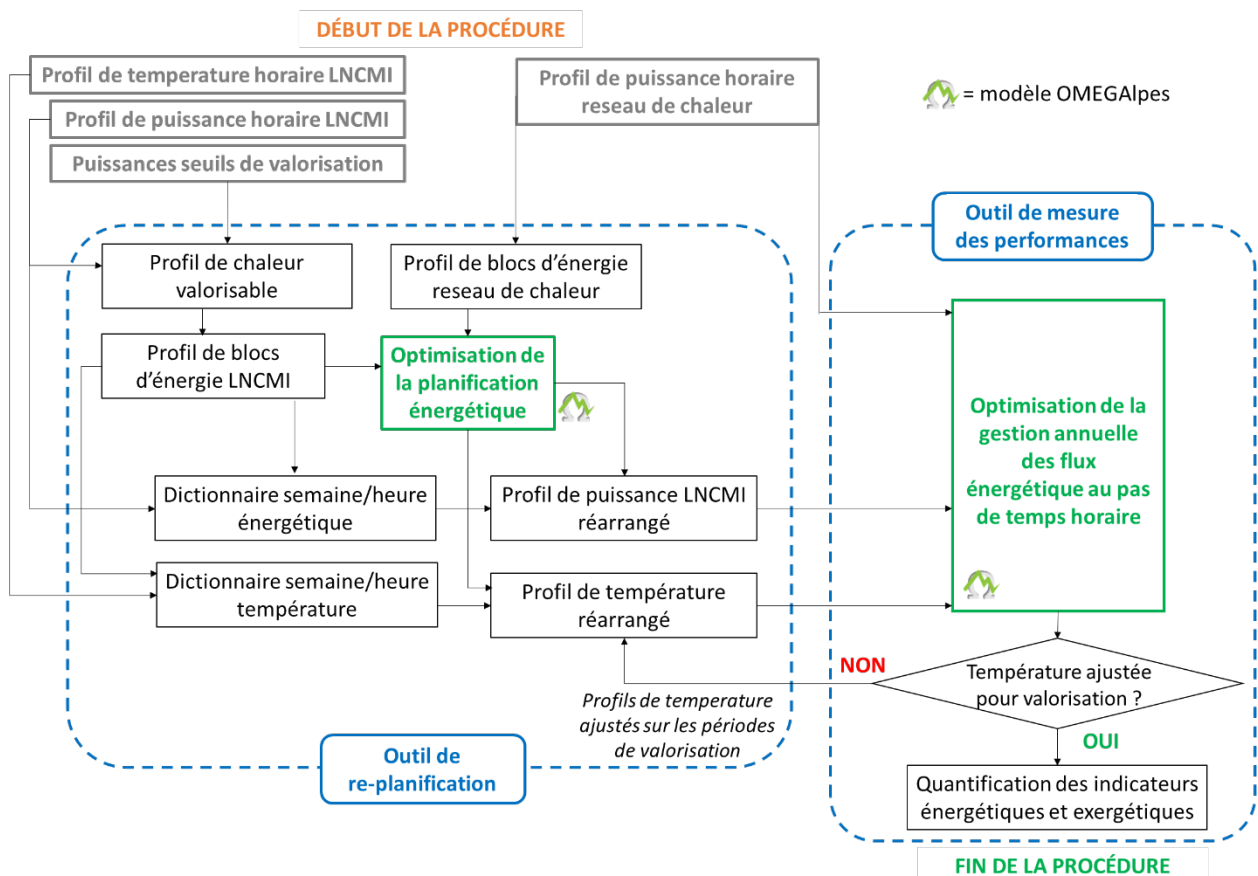


Figure IV.9 : Procédure de replanification des profils horaires de température et de puissance du LNCMI, et d'évaluation des performances énergétique et exergetique. Source : auteur

Un second modèle OMEGAAlpes plus détaillé est alors utilisé pour déterminer la gestion optimale du stockage et calculer les performances annuelles avec les profils de puissance réarrangés. Ce modèle comprend les éléments suivants (présentés Figure IV.10 selon le formalisme OMEGAAlpes) :

- Un fournisseur d'électricité alimentant à la fois le LNCMI et la pompe à chaleur.
- Une unité de conversion électricité-chaleur représentant les expériences du LNCMI.
- L'unité de dissipation de la chaleur du LNCMI dans l'Isère.
- Une unité de stockage d'énergie thermocline, avec un temps de charge ou de décharge total minimal de 3 heures. Le stockage doit atteindre son état de charge maximal au moins une fois tous les 5 jours afin d'évacuer la zone de gradient lorsqu'elle devient trop importante.
- Une unité de pompe à chaleur (PAC).
- Un réseau de chaleur.
- Une unité de production de chaleur, représentant les installations de production de chaleur propres à la CCIAG.
- Une unité de consommation de chauffage urbain.
- Plusieurs nœuds énergétiques entre les unités, assurant les bilans de puissances. Une contrainte arrête l'exportation entre le nœud de sortie de l'aimant et le nœud de valorisation lorsque la puissance du LNCMI est inférieure à la valeur seuil de 10 MW.

De même, l'objectif est de maximiser la chaleur fatale récupérée.

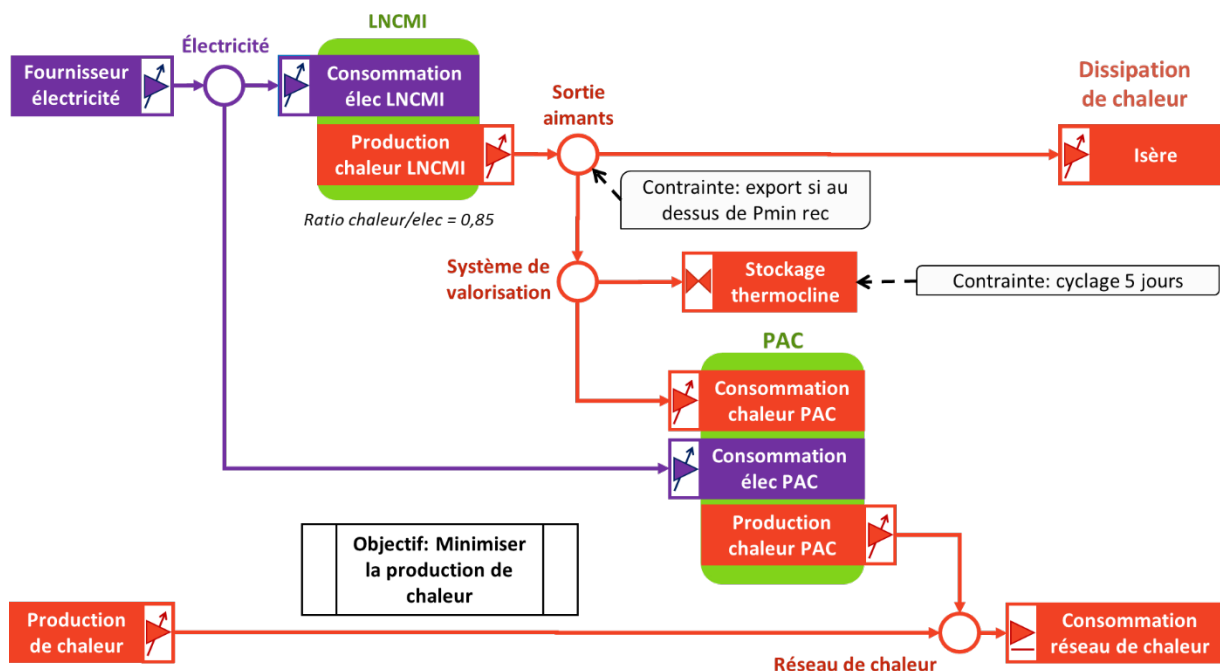


Figure IV.10 : Diagramme du modèle OMEGAAlpes pour le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI. Source : auteur

IV.2.6.1.d. Résultats énergétiques et exergétiques de la replanification

La Figure IV.11 présente le calendrier annuel des expériences du LNCMI, avant et après réarrangement. La réorganisation a été appliquée avec un pas de temps hebdomadaire (168

heures), en phase avec la durée des expériences. On constate bien que le calendrier réorganisé est mieux adapté aux besoins du réseau de district.

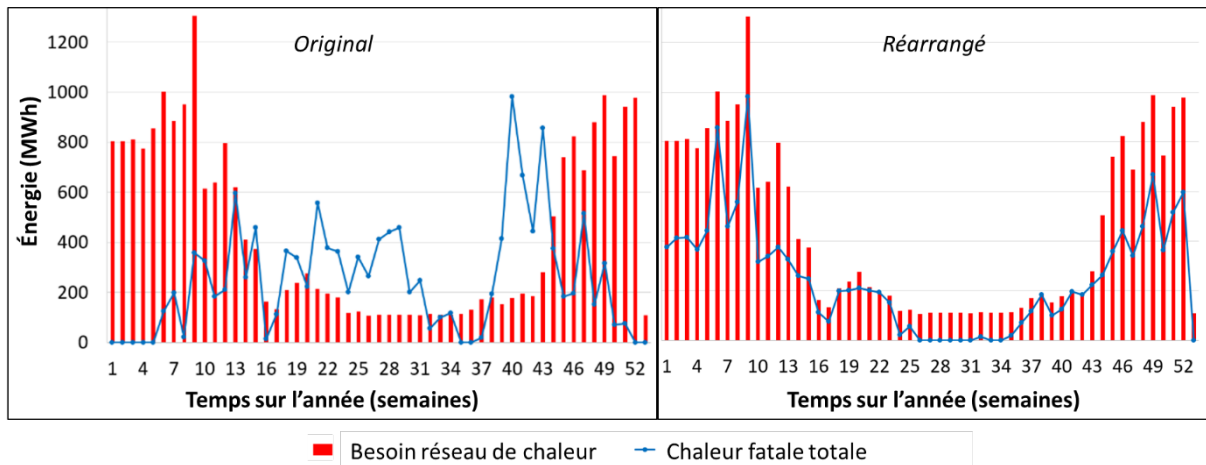


Figure IV.11 : Blocs d'énergie hebdomadaires de chaleur fatale LNCMI (bleu) et consommation réseau de chaleur (rouge) avant (gauche) et après (droite) re planification. Source : auteur

En outre, les Figure IV.12, Figure IV.13 et Figure IV.14 présentent respectivement les **résultats énergétiques, exergetiques et environnementaux** pour les différents scénarios et capacités de stockage. Les quantités de chaleur fatale valorisée ou de destruction d'exergie annuelles sont indiquées sur l'axe des ordonnées de gauche.

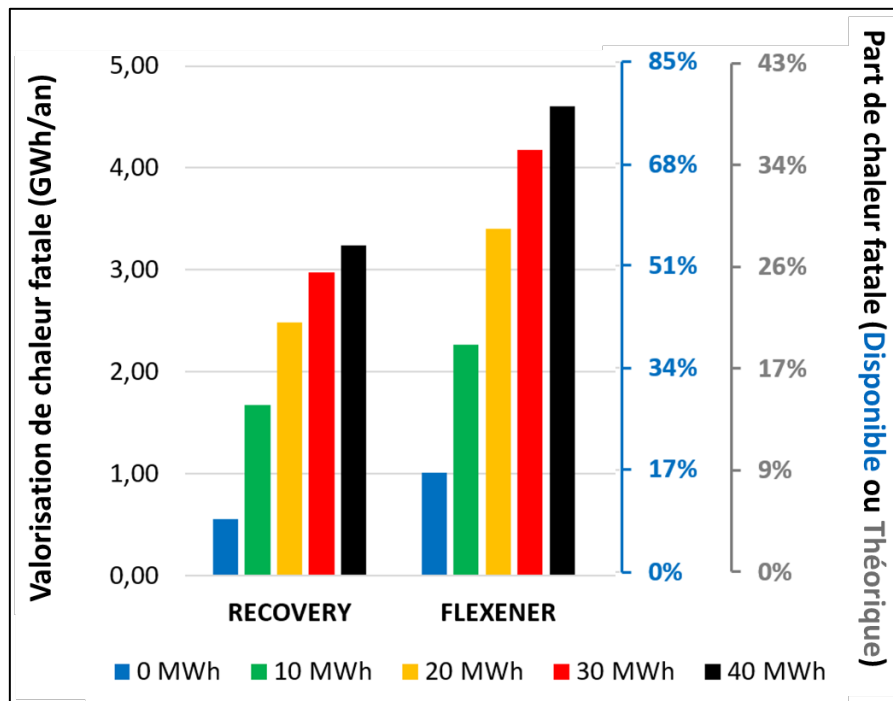


Figure IV.12 : Quantités relative et absolue de chaleur fatale valorisée pour les scénarios RECOVERY et FLEXENER pour le projet LNCMI, avec des capacités de stockage entre 0 et 40 MWh. Source : auteur & J. Fitó

Sur la Figure IV.12 l'axe des ordonnées de droite montre la part relative que ces quantités, correspondant au potentiel technique, représentent par rapport à la chaleur fatale disponible

et théorique. On constate qu'un tiers de la chaleur fatale théorique peut être récupéré dans les meilleurs cas. Toutefois, cela représente jusqu'à 70% de la chaleur fatale récupérable. L'influence du stockage thermique est également très visible. Quelle que soit la stratégie, la récupération annuelle est multipliée par 2 environ pour un stockage de 10 MWh, ou par 3 environ pour un stockage de 20 MWh. La stratégie consistant à réorganiser les expériences (« FLEXENER ») semble avoir le plus grand impact : par rapport au scénario sans flexibilité (« RECOVERY »), elle permet de valoriser entre 30% et 100% de chaleur fatale supplémentaire selon la capacité de stockage. La stratégie de gestion de la température n'est pas présentée car elle n'a pas d'influence sur les résultats énergétiques.

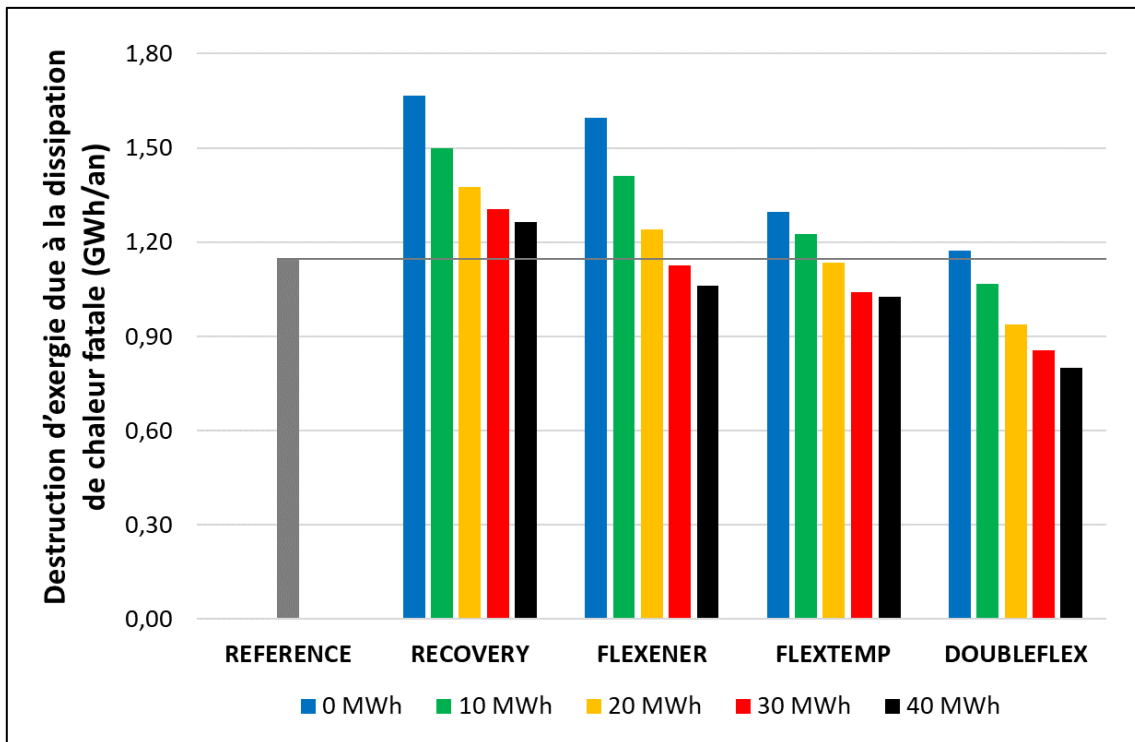


Figure IV.13 : Destruction d'exergie due à la dissipation de chaleur fatale dans les différents scénarios explorés pour le projet LNCMI, avec des capacités de stockage entre 0 et 40 MWh.
Source : auteur & J. Fitó

La **destruction d'exergie** dans le scénario sans valorisation (« REFERENCE ») est affichée avec une ligne continue indiquant le seuil d'amélioration pour les autres scénarios. Ici, tous les scénarios de flexibilité ne sont pas plus performants que le scénario de référence :

- La valorisation de chaleur sans flexibilité (« RECOVERY ») est déconseillée puisqu'elle augmente la destruction d'exergie de 10 à 45 % par rapport au scénario de référence. Un maintien de la température à 35°C ne semble pas opportun si la quantité de chaleur fatale valorisée est trop faible.
- Le scénario de réarrangement du calendrier (« FLEXENER ») ne surpasse le scénario de référence que si un stockage thermique d'une capacité de 30 MWh ou plus est utilisé.
- La stratégie d'ajustement de la température (« FLEXTEMP ») réduit la destruction d'exergie d'environ 20% par rapport au scénario « RECOVERY » pour toutes les capacités

de stockage, et passe en dessous de la référence dès la mise en place d'un stockage de 20MWh.

- Le scénario « DOUBLEFLEX » offre des synergies entre les deux stratégies précédentes, et devient pertinent d'un point de vue exergetique dès les premiers MWh de stockage installés.

En se basant sur les résultats énergétiques, une **analyse environnementale préliminaire** a été menée à bien en utilisant les émissions de GES (en tonnes de CO₂ équivalents) comme indicateur. Nous utilisons pour ce calcul la valeur moyenne des émissions de GES du réseau électrique français en 2020 ($Em_{elec} = 60\text{gCO}_2\text{e/kWh}$) et sur du réseau de chaleur grenoblois en 2021 ($Em_{RDC} = 105\text{gCO}_2\text{e/kWh}$), prenant en compte les émissions sur le tout le cycle de vie de ces systèmes [312]. Les émissions évitées (ΔGES) peuvent ensuite être calculées (équation (4)) comme la différence entre les émissions du scénario de référence et celles d'un scénario de valorisation de chaleur fatale. C'est-à-dire les émissions des chaufferies du réseau grenoblois effacées par la chaleur injectée sur le réseau par la pompe à chaleur (Q_{PAC}), auxquelles on retranche les émissions liées à la consommation électrique de la PAC (équation (3)).

$$Emission_{SPAC} = Em_{elec} * \frac{Q_{PAC}^{out}}{COP} \quad (3)$$

$$\Delta GES = Q_{PAC}^{out} * \left(Em_{RDC} - \frac{Em_{elec}}{COP} \right) \quad (4)$$

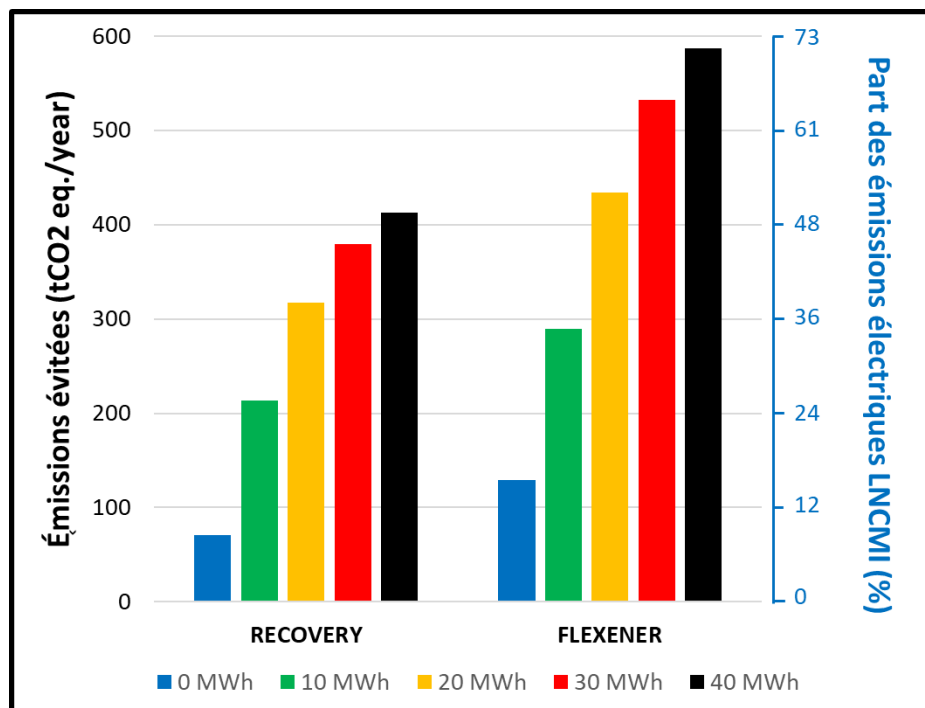


Figure IV.14 : Émissions de GES évitées avec les scénarios recovery et flexener par rapport à référence pour des capacités de stockage entre 0 et 40MWh, avec comparaison aux émissions liées à la consommation électrique du LNCMI. Source : auteur & J. Fitó

La Figure IV.14 montre les émissions de GES évitées pour les scénarios « RECOVERY » et « FLEXENER » par rapport à « REFERENCE », qui peuvent être mises en regard des émissions liées à la consommation électrique du LNCMI, i.e. 826 tons d'équivalents CO₂ par an. On

observe que la valorisation de chaleur fatale aurait un impact environnemental vertueux à la fois localement en réduisant les rejets de chaleur dans l'Isère, et globalement avec la réduction d'émissions de GES. Cela pourrait renforcer la pérennité de l'infrastructure du LNCMI dans un contexte où les vagues de chaleur peuvent forcer des centrales nucléaires à l'arrêt à cause des températures de rivières trop importantes [313]. L'équation (4) montre que, avec ces valeurs moyennes d'émissions, les émissions évitées ΔGES sont toujours positives et directement liées à la quantité de chaleur valorisée. Si ce calcul préliminaire donne un premier ordre de grandeur des émissions évitées, ces résultats devront toutefois être affinés avec la considération des émissions sur le cycle de vie du système de valorisation (PAC, stockage et matériels associés). De plus, il est très probable que la prise en compte de la dynamique des émissions ait une forte influence sur les résultats, notamment pour le réseau de chaleur dont le gros des émissions arrive durant la période de chauffe hivernale. Intégrer cette dynamique pourrait en outre donner lieu à de nouvelles stratégies de contrôle avec des objectifs de minimisation des émissions de GES.

L'ensemble des résultats est sujet à différentes hypothèses qui permettraient d'affiner le potentiel technique calculé, telles que la considération d'une température constante sur le réseau de chaleur, même si une loi d'eau est disponible dans le modèle détaillé du LNCMI pour observer son influence. Par ailleurs, la planification ne prend pas en compte les contraintes d'exploitation spécifiques du laboratoire telles que les congés ou la maintenance, mais la modélisation OMEGAAlpes permet de les inclure facilement. Enfin, l'optimisation annuelle suppose une consommation du réseau de chauffage urbain connue a priori : la connaissance de ce profil dépendra de la prévisibilité de la consommation. Les scénarios proposés pourraient en outre être appliqués pour différentes échelles de valorisation de la chaleur, du seul site du CNRS au réseau de chaleur grenoblois entier.

IV.2.6.1.e. *Conclusion et discussion*

Le travail effectué rend les stratégies de replanification et de gestion des températures proposées réalistes et performantes pour le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI. Au-delà de ces résultats, il convient de tirer un bilan pour la méthode ORUCE sur les différents travaux de recherche appliqués au terrain concret du LNCMI.

D'abord, les **pratiques de transparence et d'ouverture** mises en place tranchent avec les travaux menés précédemment sur ce cas d'étude. La diffusion des rapports d'étude précédents, rédigés par des bureaux d'étude, était restreinte au cercle du projet, et les hypothèses de travail n'étaient pas accessibles. La transparence permet ici un **accès et des choix communs** entre acteurs sur :

- *Les hypothèses* : périmètre de valorisation, température et zone d'injection, ordonnancement du système de valorisation entre la PAC et le stockage.
- *Les données* : les données de consommation électrique du LNCMI, reconstruites à partir de données brutes représentatives avec périodes de vacances et de maintenances, et un ratio entre consommation électrique du site et chaleur dissipée dans les aimants calculé et affiné au cours du projet.

- *Les méthodes et modèles* : modèles MILP utilisés en pré-études et travaux sur modèles thermiques Modelica. Les modèles ouverts sont adaptables et peuvent intégrer des problématiques concrètes du terrain, comme ici la planification semestrielle au pas de temps hebdomadaire.
- *Les résultats* : résultats énergétiques, exergetiques ainsi que bilans économique et environnemental fonction des dimensionnements et montages d'acteurs choisis.

Des partages ont ainsi pu être effectués en interne du projet avec le groupe d'acteurs impliqués rassemblant le porteur du projet et détenteur du gisement de chaleur fatale (LNCMI), l'autorité publique (GAM), l'opérateur du réseau de chaleur urbain (CCIAG), ainsi que des acteurs de la recherche : G2Elab, CEA Liten et LOCIE pour les aspects d'ingénierie énergétique, ainsi que GAEL pour des travaux économiques et PACTE pour les études de sciences sociales. Des partages externes furent aussi possibles pour des réutilisations et travaux complémentaires :

- Travaux d'analyses et supports pédagogiques avec deux projets étudiants ayant pu bénéficier de l'accès aux modèles et résultats ces dernières années avec des analyses techniques, économiques et environnementales pour l'un, et le développement de supports de médiation sur les questions énergétiques au LNCMI pour l'autre.
- Comparaison de modèles MILP entre l'outil OMEGAlpes et l'outil interne du CEA Liten.
- Diffusion et communication avec la conférence chaleur fatale organisée dans le cadre du programme de recherche Eco-SESA.

A notre connaissance, la **reproductibilité** des travaux n'a pas été mobilisée en externe. Mais les pratiques associées à la méthode ORUCE permettent de garantir un suivi et une pérennité des analyses sur le long terme, en capitalisant les hypothèses, données, méthodes, modèles et résultats mentionnés plus tôt. Cet effort pour la pérennité est particulièrement utile sur un tel projet dont les premières études remontent à 2014, et se poursuivent aujourd'hui avec une collaboration entre LNCMI, CEA Liten et G2Elab autour des potentiels de valorisation de chaleur fatale sur le seul site du CNRS. La méthode ORUCE permet aux nouveaux arrivants une prise en main et compréhension des travaux passés facilitée. De manière plus large, la méthode ORUCE permet de présenter les pratiques de reproductibilité dans le domaine lors de la présentation des travaux de recherche.

Concernant la **facilité d'usage** de la méthode, le travail sur les données archétypales et le code ouvert entre facilement dans les pratiques, à l'exception de développement collaboratif et pratiques de versionnages qui demandent une certaine acculturation. Le travail sur le notebook et suivi des étapes de la méthode ORUCE est à développer, même si ces étapes correspondent à des recommandations plutôt qu'à un format strict. Un point d'attention concerne le travail sur l'environnement : il peut s'avérer difficile à mener à bien, et n'est pas aligné avec le travail de recherche. Concrètement, il ne permet pas d'être plus efficace à court terme, et correspond à du travail « pour les autres » ou pour des usages futurs. Avec ce coût en temps et en formation par rapport aux bénéfices retirés, cela en questionne l'intérêt, surtout si le cas d'étude n'est jamais reproduit.

IV.2.6.2. Cas d'étude ORUCE comme objet de médiation auprès du LNCMI

En plus d'avoir été mobilisée sur les derniers travaux de recherche au LNCMI, une première forme de la méthode ORUCE pour de la médiation y a également été développée. L'objectif ici était de fournir un cas d'étude pour **rendre le processus de modélisation énergétique ouverte sur ce projet accessible auprès des acteurs impliqués**, en particuliers les porteurs au LNCMI. Un notebook dédié [E] a alors été développé, et comprend (Figure IV.15):

- Les informations générales du notebook (auteurs, licence, outils, ...)
- La présentation du modèle énergétique et du cas d'étude,
- 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,
- La gestion de l'environnement,
- le modèle énergétique OMEGAAlpes dont le code est accessible et dont l'utilisation est ici simplifiée par une interface utilisateur.

The image shows a Jupyter Notebook interface titled "NOTEBOOK LNCMI médiation". The notebook is open to a page with several sections, each highlighted by a blue callout box with a lettered label:

- A. Informations générales**: Points to the "General information" section, which includes context, license (Apache 2.0), and developer information.
- B. Présentation du modèle et du cas d'étude**: Points to a graphical representation of the energy system, showing components like "Security supplier", "LNCMI industrial consumption", "Magnets outlet", "Heat production", "Heat storage", "Heat distribution", "Constant maximal power dissipated in the fabricator", "Constant cycling every 5 days", "CCHG production?", "Constant limited injection depending on the network's temperature", and "Low temperature network (85 °C)".
- C. Présentation des objectifs, contraintes, hypothèses**: Points to the "Objective and constraints" section, which lists goals like maximizing recovered waste heat and lists various constraints such as LNCMI consumption profiles, power limits, and thermal storage characteristics.
- D. Explication des paramètres**: Points to the "Input Parameters" and "Thermal storage parameters" sections, detailing variables like electricity-to-heat conversion, Pmin recovery, and storage capacity.
- E. Gestion de l'environnement**: Points to the code cells, specifically the virtual environment setup and the JupyterLab notebook import.
- F. Interface**: Points to the interactive dashboard at the bottom, which allows users to adjust parameters like "Electrical-heat conversion ratio (%)", "Pmin recovery (kW)", "Storage capacity (MWh)", "Initial state of charge (%)", "The coefficient of performance", and "Heat Pump electrical power limit (kW)".
- G. Affichage résultats**: Points to the "OPTIMIZATION RESULTS" section, which displays summary statistics and a line graph showing "Power flow for the units connected to the node heat_node_recovery" over 350 hours.

Figure IV.15 : Vue d'ensemble du notebook LNCMI médiation. Source : auteur.

Afin d'être accessible à l'usage même en étant parfaitement extérieur au code, le notebook ne comprend ici que des cellules textes Markdown et images explicitant les éléments ci-dessus, à

l'exception d'une unique cellule de code. A l'exécution, celle-ci fait apparaître une interface qui permet de gérer les différents paramètres d'entrée du modèle au moyen de curseurs. On remarque que les différentes étapes de ORUCE ne sont pas ici renseignées, pour fournir un notebook synthétique et facile à prendre en main.

Ce cas d'étude est à mi-chemin entre la recherche et la médiation, puisque les acteurs sont ici principalement des chercheurs et ingénieurs impliqués dans le projet : même s'il ne s'agit pas d'un public de modélisateurs, ils sont formés sur les questions énergétiques et les enjeux du projet. Des cas d'étude où un travail de médiation plus important a été effectué seront présentés dans la section suivante (IV.3).

Ce notebook a été développé avec l'objectif de rendre accessible les travaux, mais il n'a jamais réellement été pris en main par les porteurs du projet au LNCMI. Cela peut s'expliquer par le fait qu'aucun temps n'a été dédié à un échange synchrone, permettant d'accompagner la prise en main et d'ajuster les fonctionnalités du notebook aux besoins des utilisateurs : comme mentionné dans la section III.2.5.2, ce type de notebook n'est a priori pas autoportant. Par ailleurs d'autres formes de médiation ont permis de présenter le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI de modélisation :

- Une conférence ouverte au public, et des séminaires au sein du LNCMI concernant le projet,
- Une fresque et des carnets explicatifs réalisés lors d'un projet étudiant.

Si ces formes ont permis d'introduire les enjeux énergétiques et écologiques du projet, ainsi que les intérêts d'une ouverture du processus de modélisation, le notebook permettrait a priori d'aller plus loin en donnant la capacité de manipuler directement le modèle énergétique, et ce sur la durée grâce à l'accès pérenne au cas d'étude. Ce premier retour d'expérience tend donc à souligner l'**importance des temps et supports d'échange pour la médiation**, en particulier pour une proposition de cas d'étude ORUCE. Il invite également à se questionner concernant les objectifs des temps de médiation, et à adapter les supports en conséquence.

IV.2.7. Le LNCMI : une infrastructure de recherche ouverte

Le statut du LNCMI a permis de mener à bien et d'incarner ces deux cas d'étude avec la méthode ORUCE. Le LNCMI peut en effet à la fois être considéré comme :

- un nœud socio-énergétique, i.e. un « ensemble d'éléments physiques qui collecte, convertit et/ou distribue de l'énergie, construit et/ou opéré par un acteur décisionnel en interaction avec des actants » [314]. C'est une infrastructure physique opérée par le CNRS en interaction avec la CCIAG et GAM, qui convertit de l'électricité en champ magnétique et en chaleur, et a l'opportunité de la distribuer au quartier,
- 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 (de même que les installations du CERN par exemple [36,295]).

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 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 [302], y sont également menés tels que la modélisation d'assemblages multi-acteurs [309] 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 site du LNCMI constitue ainsi un « **living-lab** », c'est-à-dire un lieu ouvert et observable, dans lequel peut être étudiée une question interdisciplinaire comme celle de la rencontre entre gisements de chaleur fatale et réseaux de chaleur, à l'échelle 1 et à l'interface des systèmes techniques et des usages des parties prenantes. Le « living-lab » LNCMI se prête dès lors à être une « scène » pour la mise au point, le déploiement et l'utilisation d'approches de science ouverte telles que celles explorées dans cette thèse.

Si les processus de modélisation énergétique ouverts ont été appliqués au projet énergétique local du LNCMI pour la valorisation de chaleur fatale, ils peuvent également être déployés pour explorer d'autres enjeux, et en particulier, l'autoconsommation PV.

IV.3. Processus de modélisation énergétique ouvert au service de la recherche et de la médiation auprès des communautés énergétiques : le cas de l'autoconsommation photovoltaïque

IV.3.1. Autoconsommation photovoltaïque : définition et enjeux

IV.3.1.1. Généralités sur l'autoconsommation

L'augmentation de la part d'énergies renouvelables couvrant notre consommation énergétique a été identifiée comme l'un des piliers d'une transition énergétique pour lutter contre le dérèglement climatique [315]. La mise en place de panneaux photovoltaïques (PV) associés à des batteries sur les sites de consommation d'énergie permet d'augmenter le taux d'autoconsommation de cette électricité photovoltaïque, c'est-à-dire la part de production consommée localement. L'autoconsommation permet notamment de diminuer les contraintes sur les réseaux de distribution liées au déploiement de sources de production décentralisées, de réduire les pertes de transport et distribution de l'électricité, et de sensibiliser le producteur à sa consommation électrique [316]. Les opérations d'autoconsommation favorisent ainsi le déploiement général de sources d'énergie photovoltaïque. Cependant, les panneaux PV, les batteries ainsi que l'électronique de puissance utilisée pour les raccorder comprennent des impacts environnementaux aux différentes étapes de leur cycle de vie, depuis l'extraction de matières premières jusqu'à la gestion en fin de vie [317].

Aussi, plusieurs thématiques peuvent être explorées autour de l'autoconsommation :

- L'**impact environnemental** des systèmes d'autoconsommation, avec la question de l'arbitrage entre degrés d'autonomie énergétique et impact environnemental,
- La **place des communautés énergétiques**,
- Le levier de la **sobriété énergétique** dans les dispositifs d'autoconsommation.

IV.3.1.2. Impact environnemental des systèmes d'autoconsommation

Alors que les mesures incitatives poussent les bâtiments résidentiels à s'orienter vers la production locale d'énergie renouvelable, il est important de souligner que chaque source d'énergie a un impact environnemental intrinsèque qu'il ne faut pas ignorer. Dans le contexte de lutte contre le dérèglement climatique, un indicateur pertinent et permettant les comparaisons est le potentiel de réchauffement global (GWP pour *Global Warming Potential*). Quantifié en kilogrammes d'équivalent CO₂ (kgCO₂-eq), il prend en compte les effets de forçage radiatif accumulés sur un horizon de temps donné, liés aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère sur le cycle de vie complet des composants du système énergétique [318]. D'autres indicateurs sont également à considérer : dans ses travaux de thèse sur le sujet, Nouha Gazbour en comptabilise par exemple 16 tels que la toxicité humaine, la pollution des eaux ou encore la consommation de minerais et ressources [317].

Dans le cas des panneaux photovoltaïques et des batteries, le mix énergétique lié à la fabrication joue un rôle important sur la quantité de GES émise [319]. D'autres facteurs tels que l'efficacité ou la durée de vie, font que les valeurs de GWP des batteries et des modules photovoltaïques sont incertaines [320,321]. En outre, et comme pour la modélisation énergétique, les données et modèles d'impacts environnementaux manquent d'ouverture

[294,322]. Des outils open source tels que openLCA, Brightway et Temporalis [323–325], ou encore le projet BONSAI autour du déploiement d'une base de données d'analyse de cycle de vie (ACV) ouverte [326] laissent envisager un changement dans les pratiques.

IV.3.1.3. *La place des communautés énergétiques*

Les communautés d'énergie (on utilisera indifféremment communauté énergétique et communauté d'énergie) reflètent un désir croissant pour des technologies plus durables, et une gouvernance locale [327], par opposition aux systèmes historiques d'extraction et de conversion d'énergie centralisés. Le terme communauté est pluriel et peut ici refléter un lieu, un processus ou encore un acteur impliqué dans des activités de production et/ou consommation d'énergie poursuivant différents objectifs : environnementaux avec la réduction des consommations et émissions de GES, économiques avec la facilitation des négociations tarifaires, ou encore politiques et sociaux [328]. Jusque récemment, les communautés énergétiques n'avaient pas de statut clair, mais elles sont rentrées dans la législation européenne depuis 2019 avec deux déclinaisons : les communautés énergétiques citoyennes (CEC) et les communautés d'énergie renouvelable (CER). Les CEC ont été introduites dans la Directive concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité [329], qui offre de nouvelles règles permettant la participation active des consommateurs, individuellement ou collectivement par l'intermédiaire de communautés énergétiques citoyennes, sur tous les marchés, soit en produisant, en consommant, en partageant ou en vendant de l'électricité, soit en fournissant des services de flexibilité par la réponse à la demande et le stockage. Les CEC sont définies comme une entité juridique « dont le principal objectif est de proposer des avantages communautaires environnementaux, économiques ou sociaux à ses membres ou actionnaires ou aux territoires locaux où elle exerce ses activités, plutôt que de générer des profits financiers ». La Directive concernant la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables [330] donne une finalité quasi similaire pour les CER, à quelques différences près concernant la participation des acteurs, la proximité aux installations, l'autonomie de fonctionnement ou encore les vecteurs énergétiques [331]. CEC et CER ont été introduites dans le droit français en 2021 dans le Code de l'énergie [332,333].

Un objectif supplémentaire pour les communautés d'énergie est celui de l'autonomie énergétique. Or l'augmentation du degré d'autonomie peut entrer en conflit avec la réduction des émissions globales de GES, avec des systèmes surdimensionnés. Dans le même temps, l'installation locale de sources d'énergie renouvelable peut entraîner des réactions comportementales vertueuses.

IV.3.1.4. *Sobriété énergétique au sein des communautés*

Les réponses comportementales à l'installation de systèmes d'énergie renouvelable, ont été soulignées dans divers travaux de recherche en anthropologie [22], en économie [334] ou en ingénierie [335]. Ceux-ci suggèrent que l'installation de systèmes photovoltaïques pourrait induire des comportements de sobriété énergétique.

On l'a évoqué dans le 0, la définition de **la sobriété énergétique** est plurielle [28,336]. En 1999, Wolfgang Sachs présentait la sobriété (*sufficiency*) en ces termes : « While efficiency is about

doing things right, sufficiency is about doing the right things » [337]. La sobriété énergétique **peut être définie comme un état** dans lequel les besoins fondamentaux des personnes en matière de services énergétiques sont satisfaits de manière équitable, et les limites écologiques sont respectées [338]. Elle peut aussi consister en **un principe d'organisation pour atteindre cet état**, ou comme l'indiquent Bierwirth et Thomas : « Les actions de sobriété énergétique sont des actions qui réduisent la demande d'énergie, pour nous amener vers un état de sobriété énergétique, tout en modifiant la quantité ou la qualité des services énergétiques demandés de manière durable sans descendre en dessous des besoins fondamentaux des personnes » [29].

Les mesures de sobriété ont été identifiées comme complémentaires à d'autres mesures de transition énergétique telles que l'efficacité et le développement des énergies renouvelables en remplacement de sources carbonées [27,339,340]. Une littérature grandissante montre que les modes de vie économes en énergie pourraient potentiellement contribuer à la réduction des émissions de GES, notamment dans les pays développés [340]. Si la contribution de la sobriété à la transition énergétique était jusqu'ici rarement explorée par rapport au seul recours à la technologie [27], elle apparaît désormais dans des scénarios de référence en France, avec les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME [341] et Futurs énergétiques de RTE [342] en plus des travaux historiques de l'association Négawatt [343], et dans le monde avec la mention explicite de politiques de « *sufficiency* » dans le rapport *Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change* du GIEC [8].

À l'échelle du bâtiment, les mesures de sobriété énergétique comprennent notamment [29,339,340] :

- l'abaissement de la température des pièces,
- les économies d'eau chaude, la réduction du nombre et de la taille des appareils (avec un séchoir à linge au lieu d'un sèche-linge par exemple),
- la préférence pour la ventilation nocturne en été plutôt que pour la climatisation
- la réduction de la surface habitable.

Si des tendances dans les réponses comportementales vertueuses à des opérations d'autoconsommation ont été observées, la quantité de retour d'expériences ne permet pour l'instant pas de les confirmer, notamment avec la difficile distinction entre la réponse à l'autoconsommation ou la réponse aux systèmes de mesures et de visualisation des consommations [344]. Sur ce dernier aspect, des travaux précédents encouragent à mobiliser aussi bien les normes descriptives qu'injonctives, e.g. en comparant les ménages et en qualifiant favorablement les ménages sobres [115]. Enfin des enquêtes de terrain indiquent que la mise en place d'installations d'énergies renouvelables collectives amène des facteurs positifs non-quantifiables, tels que la fierté et le rôle social des citoyens, ou encore la médiation d'un rapport particulier à la nature [117].

La considération d'hypothèses de sobriété dans la modélisation énergétique des systèmes d'autoconsommation PV, justifiées par les réponses comportementales, aurait une incidence directe sur la conception du système en termes d'indicateurs énergétiques et

environnementaux. Cela permettrait de faire une distinction nette par rapport au maintien du statu quo dans les scénarios énergétiques.

IV.3.2. ORUCE appliquée à l'autoconsommation photovoltaïque

Dans leur synthèse sur l'autoconsommation photovoltaïque dans les bâtiments, Luthander et al. suggèrent qu' « une étape supplémentaire importante pour la recherche dans ce domaine est de faire des études plus comparables pour des échantillons plus représentatifs de bâtiments et d'utilisateurs finaux » [335]. De plus, la littérature existante manque de transparence quant aux données et modèles utilisés [107]. Si on ajoute à cela l'aspect assez emblématique de l'autoconsommation PV dans la modélisation énergétique à l'échelle du quartier, ses intérêts concernant la transition énergétique, et le contexte politique actuel favorable avec les nouveaux règlements européens définissant les communautés énergétiques citoyennes et son implémentation par les collectifs citoyens, l'autoconsommation PV dans les bâtiments apparaît comme un cas d'étude pertinent pour appliquer la méthode ORUCE. Les sections suivantes présentent des applications de la méthode ORUCE autour de l'autoconsommation dans 3 contextes :

- ORUCE sur un cas d'étude de recherche,
- ORUCE comme objet pédagogique,
- ORUCE comme support de médiation auprès de collectifs citoyens.

IV.3.3. Cas d'étude autour de l'autoconsommation face aux enjeux de transition dans la recherche

IV.3.3.1. Informations générales

Différents cas d'étude d'autoconsommation peuvent être envisagés pour contribuer à la recherche autour des thématiques évoquées précédemment, en mobilisant la méthode ORUCE. L'objectif dans ce premier cas d'étude est d'**étudier l'arbitrage à réaliser entre degrés d'autonomie énergétique et impacts environnementaux**. Ainsi, nous cherchons à dimensionner un système énergétique composé de panneaux photovoltaïques et de batteries dans le cadre d'une opération d'autoconsommation à l'échelle d'un foyer. Nous menons une optimisation bi-objectif afin de maximiser la couverture de la consommation locale par de l'électricité photovoltaïque d'une part, et de minimiser l'impact environnemental du système énergétique sur son cycle de vie complet d'autre part. Ce cas d'étude se base notamment sur un article présenté lors du Symposium de Génie Électrique en 2020 [241]. Un notebook y est associé [F], mobilisé dans le notebook ORUCE présenté précédemment [C].

IV.3.3.2. Gestion des données

Les données utilisées sont les mêmes que dans le cas d'étude présenté dans le chapitre précédent, se référer donc à la section III.2.3.3. Afin de réduire le nombre de variables d'optimisation, une opération de clustering a été menée sur ces profils annuels de consommation et d'ensoleillement. Le clustering permet ici d'extraire des jours représentatifs et poids associés à partir d'un jeu de données d'une année complète. C'est une méthode adaptée à la réduction de période d'étude et donc du nombre de variables pour l'optimisation énergétique à l'échelle bâtiment [345]. Nous utilisons ici une approche de clustering par K-Means, utilisant la distance euclidienne [346]. Les jours types obtenus à partir de données

d'enneillement à Grenoble en 2019 et de consommation moyenne de français sont le 4 janvier, le 29 août et le 27 novembre avec des poids respectifs de 50, 180 et 135 jours. Ces jours sont typiques d'un jour d'hiver, un jour d'été, et un jour d'intersaison proche de l'hiver, et sont présentés Figure IV.16. Comme dans la section III.2.3, le modèle de Nguyen et al. [283] est utilisé pour déterminer la production PV à partir des valeurs d'enneillements directs (DNI) et diffus (DHI).

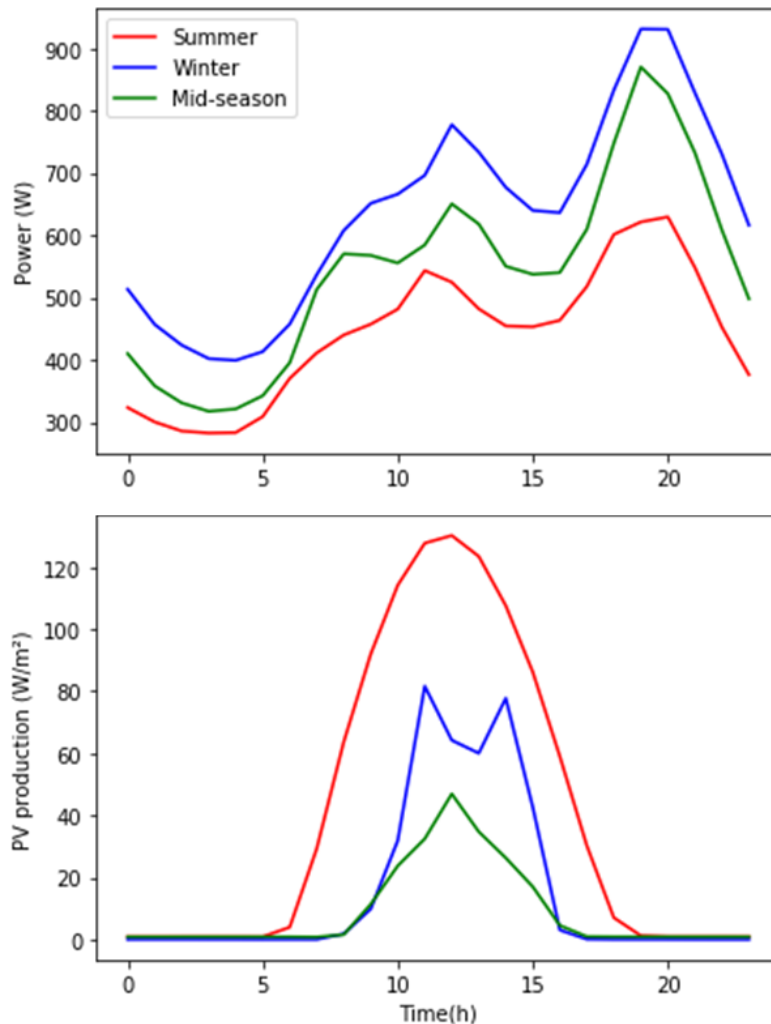


Figure IV.16 : Consommation électrique d'un foyer français et production photovoltaïque par mètre carré (azimut de 0° et inclinaison de 25°) pour trois journées types d'été en rouge, hiver en bleu, et mi-saison en vert. Source : auteur

La valeur de GWP des panneaux PV est une valeur médiane $1040 \text{ kgCO}_2\text{-eq/kWc}$ ¹⁹ provenant du projet INCER-ACV [347] de l'ADEME, ayant étudié la distribution statistique des valeurs d'impacts environnementaux pour la filière photovoltaïque. Le GWP des batteries Lithium-ion est considéré comme égal à $158 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ par kWh de capacité de batterie avec une durée de vie associée est d'environ 8 ans, en considérant un cycle par jour [321]. La profondeur de décharge maximale (DoD pour *Depth of Discharge*) est considérée comme égale à 80%. Les

¹⁹ Soit environ $41 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$, en considérant une production de l'ordre de 1000 kWh/an/ pour 1 kWc de panneaux PV installés.

émissions de GES moyennes du réseau français sont comptabilisées en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie des infrastructures, soit une moyenne de 57 gCO₂eq/kWh [348]. Ainsi on dispose de données ouvertes pour notre cas d'étude d'autoconsommation PV, aussi bien pour la consommation que pour le productible PV, les paramètres environnementaux ou encore dans le traitement des données.

IV.3.3.3. Présentation du modèle énergétique

Ce cas d'étude a pour vocation d'être ouvert et appropriable, permettant aux utilisateurs de faire varier les données, hypothèses et objectifs, ou encore d'affiner le modèle. Ainsi, un modèle simplifié mobilisant l'outil d'optimisation NoLOAD [240] et présentant des temps de calculs faibles a été privilégié : d'abord avec le recours au clustering pour simplement fournir 3 jours types représentatifs de l'année complète, et de plus, la dynamique de pilotage de la batterie n'a pas été considérée ici du fait de l'évolution cyclique de ces profils, en considérant un cycle charge - décharge par jour. L'énergie stockée sur une journée est alors considérée comme un scalaire calculé sur chaque jour type, là où les puissances PV et de consommation sont des séries temporelles au pas de temps horaire. Les imports et exports sur le réseau électrique sont ainsi calculés pour chaque jour type comme suit :

$$exp = \sum_{h=0}^{23} \max(P_{PV}(h) - P_{load}(h), 0) - eff_{sto} * e_{sto} \quad (5)$$

$$imp = \sum_{h=0}^{23} \max(P_{load}(h) - P_{PV}(h), 0) - eff_{sto} * e_{sto} \quad (6)$$

Avec *exp* et *imp* respectivement les exports et imports sur le réseau électrique, P_{PV} et P_{load} respectivement les puissances PV et de consommation au pas de temps horaire, eff_{sto} l'efficacité du stockage considérée identique à la charge et décharge et e_{sto} l'énergie du stockage chargée pour le calcul d'export, et déchargée pour celui d'import. Les imports et exports sont contraints pour prendre des valeurs positives ou nulles. La Figure IV.17 présente les aires d'énergie non-autoconsommée et non-autoproduite, donc respectivement exportée et importée, aux cycles de charge et décharge de batterie près pour la journée du 29 août.

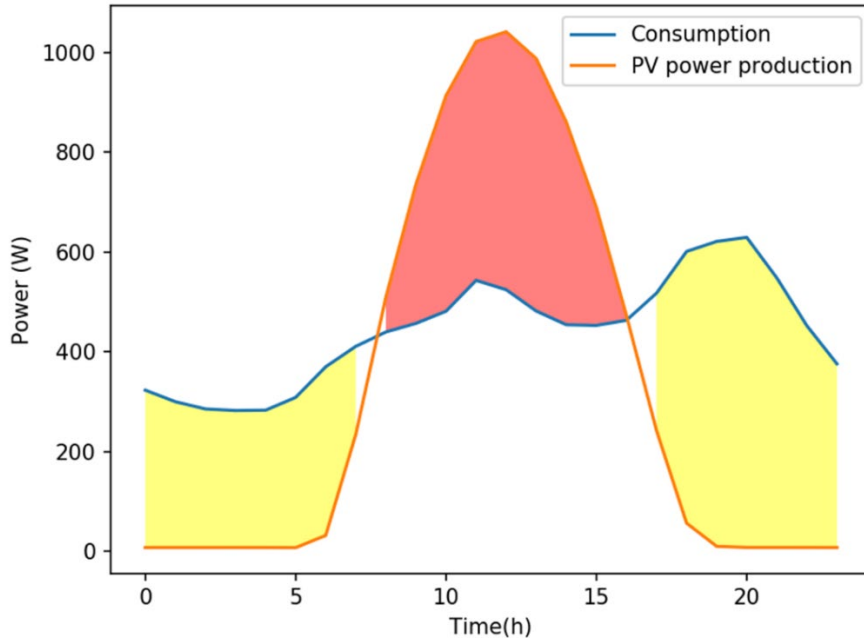


Figure IV.17 : Exemple de profils de production PV et de consommation d'un foyer avec énergie non-autoconsommée (rouge) et non-autoproduite (jaune) le 29 août, pour 8m² de panneaux PV, une inclinaison de 25° et un azimut de 0°.

La capacité de la batterie sera ensuite déterminée comme la valeur maximale des e_{sto} pour les différents jours types, en intégrant les limites de profondeur de charge et décharge. L'indicateur de couverture utilisé est le Load Cover Factor (LCF), aussi appelé autoproduction, i.e. la part de consommation électrique couverte par de la production locale [349]. Dans notre cas, le LCF est calculé pour chaque jour type comme suit :

$$LCF = \frac{E_{load-imp}}{E_{load}} \quad (7)$$

avec E_{load} l'énergie en Wattheure consommée par le foyer au cours d'une journée et imp les imports via le réseau électrique. Il est bon de noter que l'utilisation du seul LCF maximise la production photovoltaïque pour couvrir la consommation locale, et peut conduire à des systèmes surdimensionnés car visant l'autonomie énergétique sans prise en compte des exports sur le réseau. Dans notre cas, la considération des émissions de GES sur tout le cycle de vie du système permet d'éviter un tel écueil, mais un indicateur de Supply Cover Factor (SCF), aussi appelé autoconsommation, est également mis à disposition dans les calculs et complémentaire du LCF. Au final, un indicateur "non-LCF" a été défini comme un objectif à minimiser pour le modèle d'optimisation. Il comprend l'indicateur LCF sur les différents jours typiques, représentatifs d'une année complète :

$$non - LCF = \sum_{0 \leq d < nb \text{ days}} \frac{w_d}{365} * (1 - LCF_d) \quad (8)$$

où nb_days est le nombre de jours types, w_d le poids de chaque jour type, c'est-à-dire le nombre de jours que le jour type représente et LCF_d le LCF de charge pour chaque jour type.

Les variables d'optimisation du modèle sont la surface des panneaux PV et leur inclinaison et azimut qui permettront de calculer la production PV, ainsi que l'énergie stockée pour chaque

jour type, qui donnera la valeur de la capacité de la batterie. Les surfaces des panneaux sont contraintes entre 1 et 25m² et l'énergie stockée est contrainte pour être inférieure à 4 kWh (soit une capacité de stockage maximale de 5kWh en prenant en compte le DoD). La considération de l'inclinaison et l'orientation des panneaux avec le modèle de panneaux PV rend le problème non-linéaire et justifie donc l'utilisation de l'outil d'optimisation NoLOAD.

Concernant la mesure des impacts environnementaux, l'unité fonctionnelle considérée pour cette étude est la suivante : consommer de l'électricité selon un profil donné sur 30 ans avec un total de 4586 kWh par an, à partir de l'électricité issue du réseau et d'un système de panneaux PV et batterie. Seul l'indicateur de GWP est pris en compte, il est calculé comme suit :

$$GWP = \underbrace{PV_{GWP} * PV_s * \frac{duration}{PV_{lifespan}} + bat_{GWP} * bat_{capa} * \frac{duration}{bat_{lifespan}}}_{CAPEX_{GES}} + \underbrace{grid_{em} * grid_{imp} * duration}_{OPEX_{GES}} \quad (9)$$

avec :

- GWP le potentiel de réchauffement climatique global du système énergétique (kg CO₂ eq.),
- PV_{GWP} le GWP des panneaux PV, onduleurs et connectiques par unité de surface,
- PV_s la surface de panneaux PV,
- $duration$ la durée d'étude, ici 30 ans,
- $PV_{lifespan}$ la durée de vie des panneaux PV (30 ans),
- bat_{GWP} le GWP des batteries par unité de capacité des batteries,
- bat_{capa} la capacité de la batterie (Wh),
- $bat_{lifespan}$ la durée de vie de la batterie (années),
- $grid_{em}$ les émissions de GES issues de la consommation d'électricité du réseau sur tout le cycle de vie des installations par unité d'énergie consommée (kg CO₂ eq./kWh),
- $grid_{imp}$ la consommation d'électricité réseau d'un foyer sur 30 ans (kWh).

On notera que pour une telle consommation électrique annuelle, un foyer raccordé au réseau seul émettrait 7472 kgCO₂eq au total sur les 30 années d'études considérées.

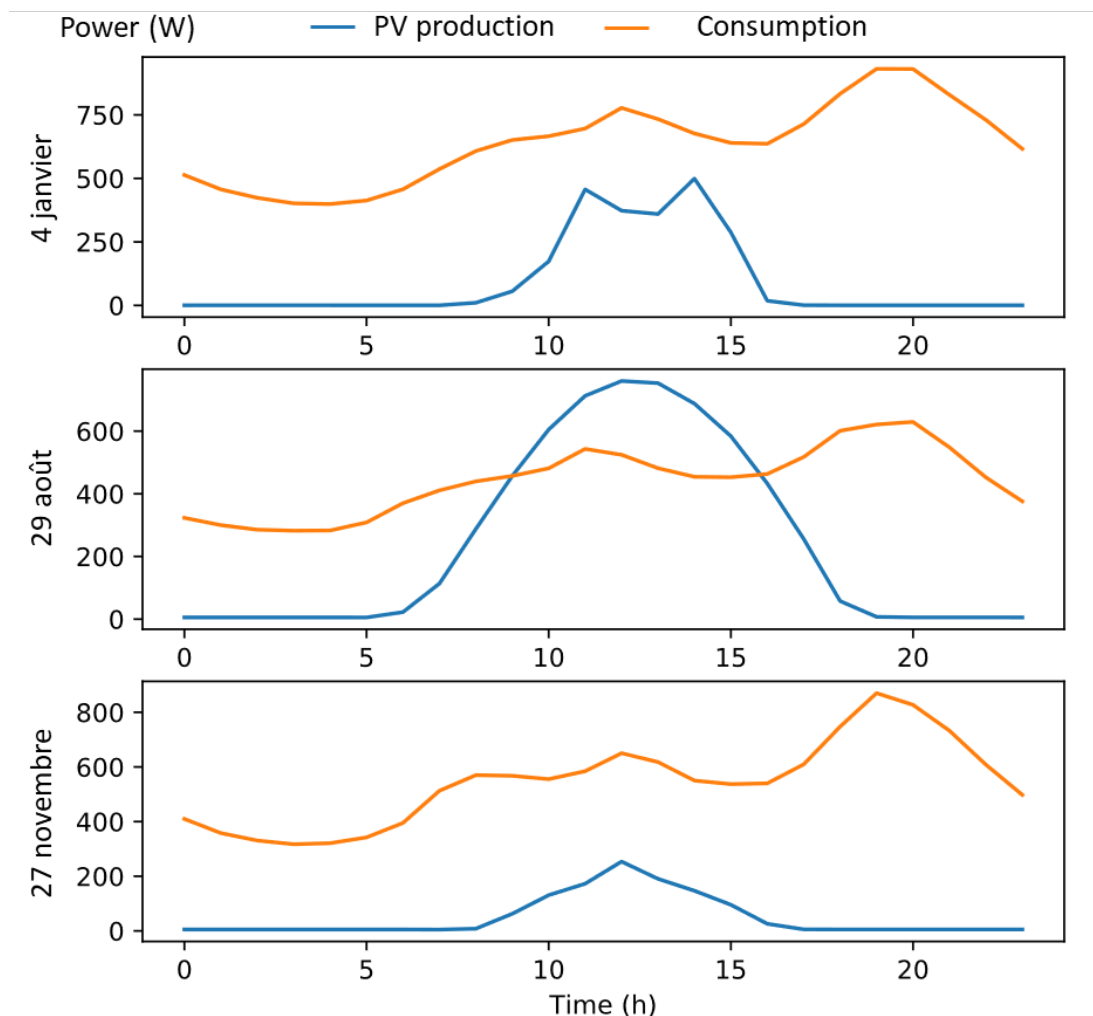
On peut établir une analogie entre les coûts économiques et environnementaux. D'une part, les émissions de GES liées à la fabrication et au démantèlement sont rapprochées d'un coût fixe d'investissement (CAPEX pour *Capital Expenditure*). D'autre part, les émissions liées à l'utilisation du système (i.e. la consommation d'électricité sur le réseau qui dépend du mix électrique local) sont rapprochées de coût d'opération (OPEX pour *Operational Expenditure*). Il est bon de noter que l'électricité PV exportée sur le réseau n'est pas comprise ici comme un effacement d'émissions de GES dans les OPEX, car cela dépasse l'unité fonctionnelle. En outre on ne peut considérer le réseau électrique comme un stockage infini. On se place du point de vue d'un consommateur, pour répondre à ses besoins énergétiques locaux : les exports sont donc en dehors de ce cadre. On s'attend à ce que plus la taille des panneaux augmente, plus les imports du réseau sont réduits et donc plus les OPEX diminuent. Dans le même temps, les CAPEX liés aux panneaux et éventuellement aux batteries augmenteront.

IV.3.3.4. Gestion des résultats

Avant d'accéder aux résultats finaux, plusieurs itérations des données brutes aux résultats ont été nécessaires. Ces itérations peuvent s'avérer particulièrement délicates à gérer, car liés à des choix :

- de signification des résultats, i.e. ce qu'on souhaite monter en fonction des objectifs (SCF, LCF, émissions de GES) ou des limites de variables pour la surface PV ou la capacité des batteries par exemple
- de paramétrage technique de l'optimisation, avec le choix des valeurs initiales, précision et nombre d'itération maximal par exemple.

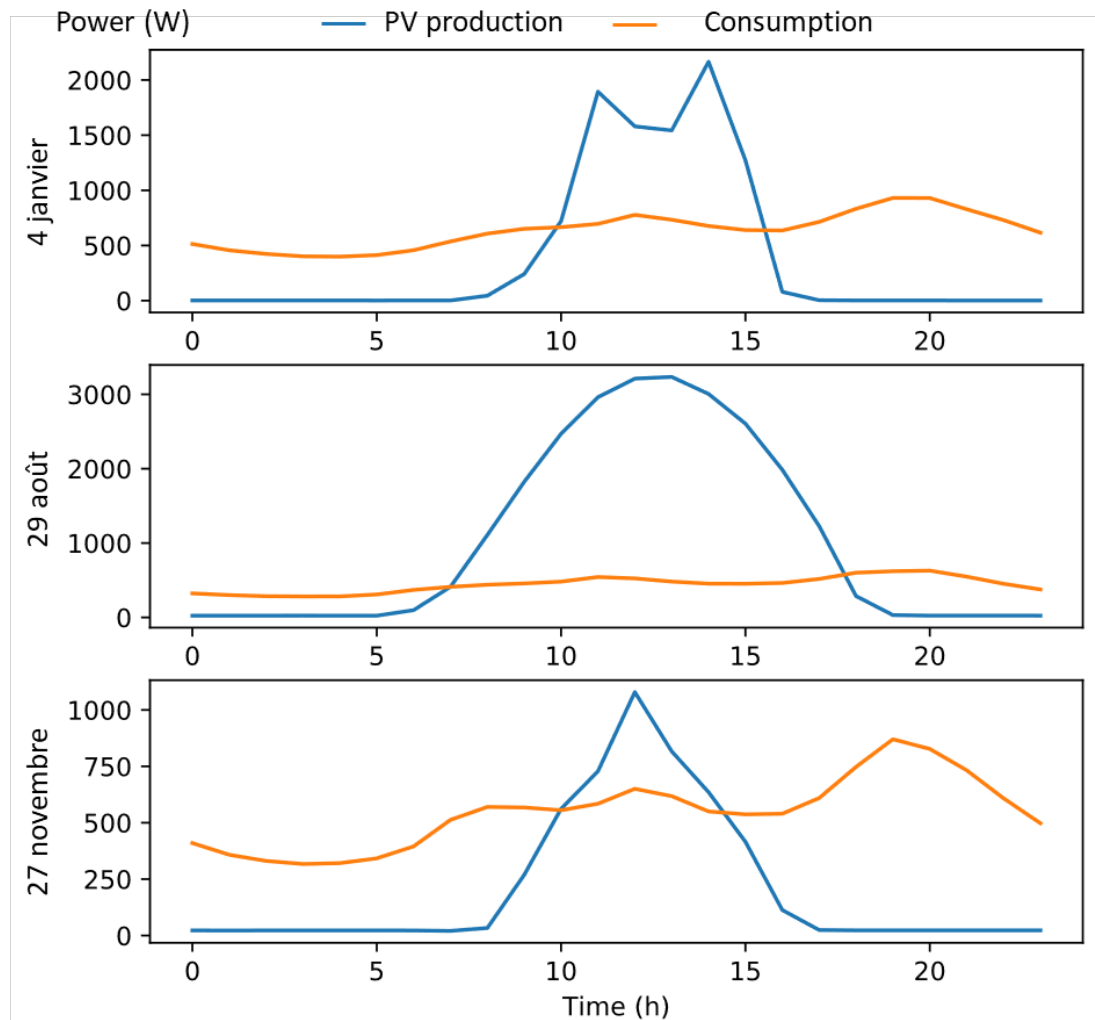
Les résultats sont présentés -ci-après, d'abord en mono-objectifs puis sous forme de courbe de Pareto. Les Figure IV.18 et Figure IV.19 présentent la consommation et production PV pour les 3 jours types et les résultats d'optimisation, respectivement pour l'objectif de minimisation des émissions de GES et de maximisation du LCF.



Surface (m ²)	Azimut (°)	Inclinaison (°)	Capacité (kWh)	Émissions GES (kgCO ₂ eq/kWh)	LCF
5,8	23,7	30,7	0	6612	0,16

Figure IV.18 : Résultats d'optimisation avec objectif de minimisation des émissions de GES pour 3 jours types de l'année 2019. Source : auteur.

Pour l'objectif de minimisation des émissions de GES, on observe bien des émissions totales inférieures à celles obtenues sur le réseau seul. La capacité de la batterie est nulle et la surface PV est assez faible de sorte que l'énergie PV remplace autant que possible l'électricité du réseau tout en maintenant les exports vers le réseau nuls en dehors de la mi-journée le 29 août.



Surface (m ²)	Azimut (°)	Inclinaison (°)	Capacité (kWh)	Émissions GES (kgCO ₂ eq/kWh)	LCF
25	35,3	27,9	5000	14092	0,74

Figure IV.19 : Résultats d'optimisation avec objectif de maximisation du LCF pour 3 jours types de l'année 2019. Source : auteur.

Pour l'objectif de maximisation du LCF, l'optimisation vient logiquement bloquer contre les bornes supérieures pour la surface des panneaux PV et la capacité de la batterie pour atteindre un niveau d'autoproduction le plus élevé possible. En dehors des choix d'inclinaison et d'azimut, l'optimisation est donc ici triviale, notamment car aucune pénalité ou limite n'est fixée pour les exports. La considération des émissions de GES permet de contrebalancer cet effet, mais la prise en compte du SCF peut aussi fournir des compromis pertinents pour ce dimensionnement.

La Figure IV.20 présente les résultats sous forme de courbe de Pareto entre l'objectif de minimisation des émissions de GES en ordonnée et de minimisation de l'indicateur non-LCF en abscisse.

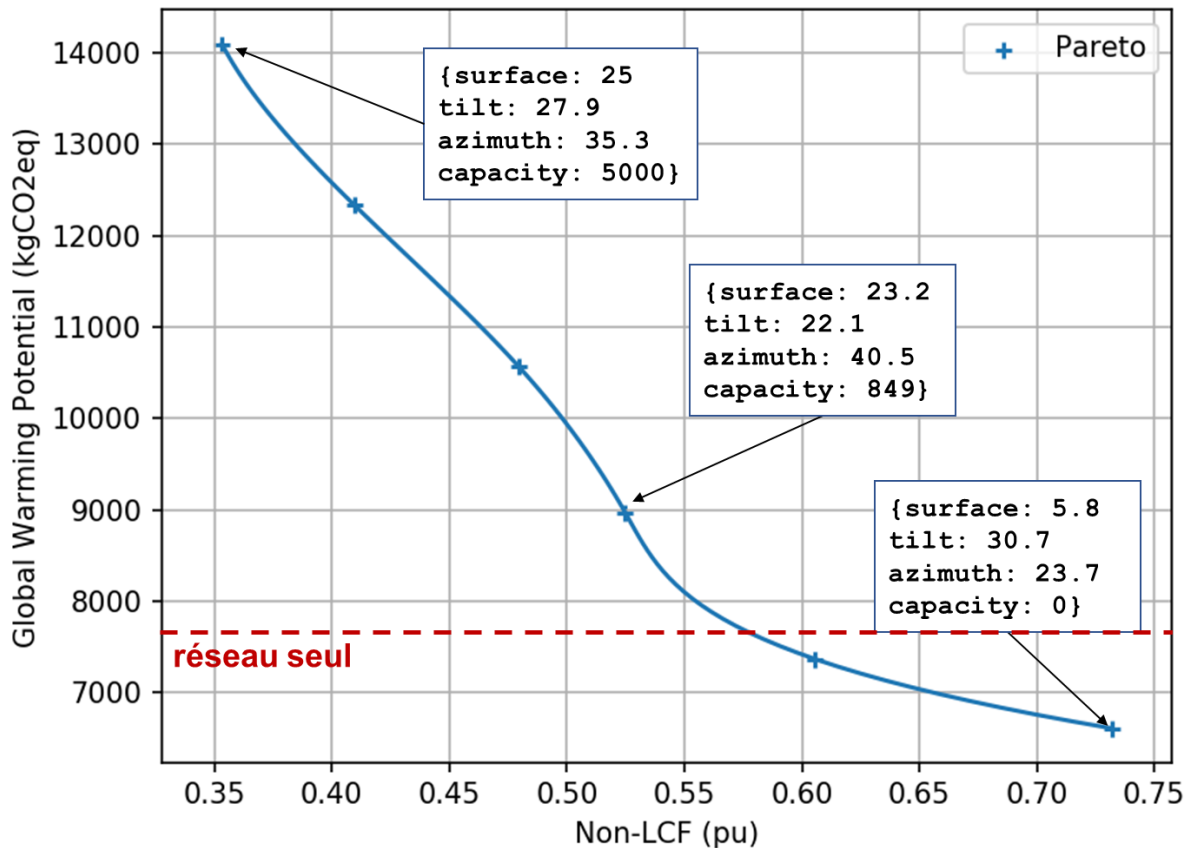


Figure IV.20 : Courbe de Pareto présentant les résultats d'optimisation entre objectifs de minimisation des émissions de GES et de maximisation du LCF pour un foyer en autoconsommation PV. Source : auteur.

Le détail des surfaces PV, azimuts, inclinaisons et énergies stockées pour les différents points de cette courbe de Pareto sont disponibles dans l'Annexe 17. On y remarque notamment que l'azimut Sud - Sud-Est et l'inclinaison prennent des valeurs sensiblement identiques pour les différents points d'optimisation. L'inclinaison notamment est le résultat d'un compromis : assez élevée pour réduire l'amplitude de la cloche de productible PV d'été, mais assez faible pour ne pas trop dégrader l'énergie récupérée annuellement. Un léger coude peut être observé lorsque l'indicateur d'émissions dépasse les émissions « réseau seul » : c'est à partir de là que les valeurs de capacité deviennent non-nulles. On remarque également que la surface des panneaux PV augmente assez rapidement, et atteint sa borne maximale alors que les premiers kWh de stockage sont mobilisés. Le point de dépassement par rapport au réseau seul est important, car il vient questionner la pertinence du système énergétique en matière de lutte contre le dérèglement climatique avec les données et hypothèses prises en compte. Au final, le choix de dimensionnement issue du compromis entre degrés d'autonomie énergétique et émissions de GES dépend du choix de l'utilisateur, mais peut être guidé par de tels résultats.

IV.3.3.5. Conclusion et discussion

La méthode ORUCE offre ici la possibilité d'adapter le cas d'étude à différentes situations, par exemple en faisant varier les technologies de batteries ou de panneaux PV. Elle permet également de comparer différents modèles énergétiques, méthodes de réduction de la période d'étude ou du modèle, et techniques d'optimisation.

La majorité des approches actuelles sur ces sujets sont relativement fermées : on peut citer le rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) sur l'ACV de systèmes résidentiels PV et batteries [350], qui présente une méthode et des résultats dans un document accessible en ligne mais sans licence d'utilisation, et sans accès aux données, codes et hypothèses associées aux modèles. Par rapport aux approches fermées, la méthode ORUCE replace ici les données et les modèles dans le contexte du cas d'étude, en soulignant les dépendances fortes que peuvent avoir les résultats aux :

- Données : profils d'ensoleillement et de consommation dépendant du lieu, émissions de GES dépendantes du mix énergétique, ...
- Paramétrages : bornes d'exploration pour la surface PV et la capacité de batterie, choix des indicateurs d'autoconsommation entre LCF et SCF, ...
- Hypothèses : choix de l'unité fonctionnelle et des frontières pour la comptabilisation des émissions de GES, considération d'émissions moyennes ou dynamiques pour le réseau, ...

Les cas d'étude sont accessibles, utilisables et transférables pour des travaux futurs, ce qui peut favoriser la confiance et la collaboration entre les parties prenantes, et de manière générale permet de limiter les erreurs et les biais.

D'autres enjeux ont été explorés autour du sujet de l'autoconsommation avec différents chercheurs.

- L'article « Including greenhouse gas emissions and behavioural responses in the optimal design of PV self-sufficient energy communities », d'abord présenté en conférence [351] puis publié dans le journal COMPEL [352] explore la place de la sobriété en plus du calcul des émissions de GES, pour les opérations d'autoconsommation collective. Le processus de clustering est qualifié plus en détail avec la sélection de 5 semaines types au pas de temps 15 minutes. Les incertitudes du GWP des panneaux PV y sont prises en compte, ainsi que la dynamique des émissions de GES du réseau électrique, et des scénarios de sobriété énergétiques sont considérés pour les cas français et allemands.
- Dans la continuité, l'article « Solar panels: Is more always better? - Assessing the carbon footprint of communities » publié dans la revue TATuP [353] propose d'explorer ces mêmes questions pour une variété de profils de consommation, avec l'introduction d'un indicateur d'« autosuffisance naturelle » (*NSS pour Natural Self-Sufficiency*) pour évaluer le potentiel d'absorption d'une production intermittente pour un profil de consommation donné. L'évolution du NSS permet également de qualifier la flexibilité d'un profil de consommation.

- Enfin l'article « Optimal Sizing of Stationary Battery Storage Taking into Account Indirect Flexibility in Tertiary Buildings: Use case of an Electric Vehicle Community » présenté à la conférence CIRED [354] prend une approche différente en s'intéressant à la flexibilité permise par les flottes de véhicules électriques.

Même si au moment de ces collaborations, la méthode ORUCE était encore en cours de développement, ces travaux avec d'autres chercheurs ont permis de pointer du doigt des avantages et limites pour l'application de la méthode. D'abord la méthode peut servir de rappel de **bonnes pratiques** : tous ces travaux sont par exemples mis à disposition dans des notebooks sous licence ouverte, avec précision des sources de données et hypothèses principales. Ces notebooks ont été développés selon les principes ORUCE qui étaient formulés au moment des travaux, et utilisés comme matériel supplémentaire pour les articles de recherche : ils tendent vers une ouverture du processus de modélisation énergétique. L'appropriation et la mise en place de la méthode ORUCE semblent ainsi être **accessibles** pour ces chercheurs, même si des limites persistent. D'abord certains de ces travaux donnent lieu à des fichiers de notebooks lourds, et peuvent réclamer des temps de calcul importants. La reproduction de l'intégralité des travaux peut donc dépendre de la puissance de calcul disponible. Une parade au problème de la taille des notebooks a été de répartir les étapes de la modélisation dans plusieurs notebooks hébergés dans un même dossier. Si on perd la vue d'ensemble du processus, la mise en place de fichiers plus légers permet notamment l'affichage des notebooks dans les répertoires partagés tels que Gitlab.

IV.3.4. Le cas d'étude ORUCE pour l'autoconsommation : un objet pédagogique

Le cas d'étude ORUCE autour de l'autoconsommation présenté dans la section précédente a également été mobilisé comme support pédagogique dans le cadre d'enseignement auprès d'étudiants architectes de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (ENSAG). L'objectif de ce cours était triple :

1. Une introduction aux enjeux énergétiques,
2. Une introduction à la modélisation énergétique, avec les avantages de la science ouverte,
3. Une mise en application de ces principes pour ces étudiants peu familiarisés à ces concepts et outils.

Le format de l'enseignement était une séance en distanciel de 4h, avec un mode de classe inversée où les étudiants avaient en amont accès à des ressources synthétiques d'acculturation à l'autoconsommation, ainsi qu'un tutoriel d'utilisation des Jupyter Notebooks. En plus des supports de cours [G], un notebook [H] a ainsi été mis à disposition des étudiants pour la partie mise en pratique, et utilisé en ligne via le service Mybinder. Ce notebook est directement inspiré du notebook de la section précédente, mais présenté en français, avec un langage plus accessible et une introduction théorique des concepts, et pratique de la manipulation de code. Contrairement au notebook de médiation LNCMI, ce notebook comprend donc des cellules de code explicitées. Un extrait de ce notebook dans l'environnement Jupyter proposé par Mybinder est présenté Figure IV.21.

jupyter dimensionnement_PV_ENSAG (modifié) Visit repo Copy Binder link

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Non fiable Python 3 (ipykernel) O

Exécuter Memory: 147 MB / 8 GB

Test exécution de code

Un petit test pour vérifier que tout fonctionne. Dans la cellule ci-dessous, entrez ce que vous voulez après message = ... (en conservant les guillemets, puis exécutez la cellule. Votre message devrait s'afficher :)

```
Entrée [68]: message = "Ceci est un message test"
             print(message)
```

Ceci est un message test

1. Données d'entrée et hypothèses de modélisation

Il est important d'être transparent sur les hypothèses de modélisation qui ont été faites, ainsi que sur les données d'entrée et leur provenance. Cela afin de bien comprendre les résultats que l'on obtiendra, mais aussi leurs limites.

Profils d'ensoleillement et consommation du foyer

On peut bien sûr choisir et modifier les profils d'ensoleillement et de consommation selon le cas spécifique du lieu et conditions dans lesquelles on se trouve. Ici, nous prenons le cas d'un ensoleillement à Grenoble grâce à la [station météo](#) située sur le toit du bâtiment GreEn-ER.



Figure IV.21 : Extrait du notebook présenté aux étudiants de l'ENSAG dans l'environnement Jupyter proposé par Mybinder.

Les étudiants étaient divisés en sous-groupes en semi-autonomie : ils avançaient ensemble en suivant les indications du notebook, et je passais en tant qu'encadrant et support dans les différents sous-groupes pour des explications théoriques et de l'aide pratique. L'évolution au sein du notebook leur permettait d'abord d'en percevoir les fonctionnalités, puis d'avoir un exemple d'import et gestion de données. La présentation du modèle énergétique et de résultats associés, en fonction de la surface, inclinaison et orientation des panneaux PV leur permettait de percevoir l'intérêt d'outils d'optimisation pour le dimensionnement de tels systèmes.

Le retour des étudiants sur cette séance, et en particulier sur la méthode ORUCE et l'utilisation des notebooks sont présentés Figure IV.22. Ces retours ont été collectés dans les jours suivants l'enseignement, de manière anonyme pour favoriser l'expression critique de chacun.e. Sur les

21 étudiants présents, 14 réponses ont été collectées. A noter que la formulation « positive » des questions peut entraîner un biais de complaisance.

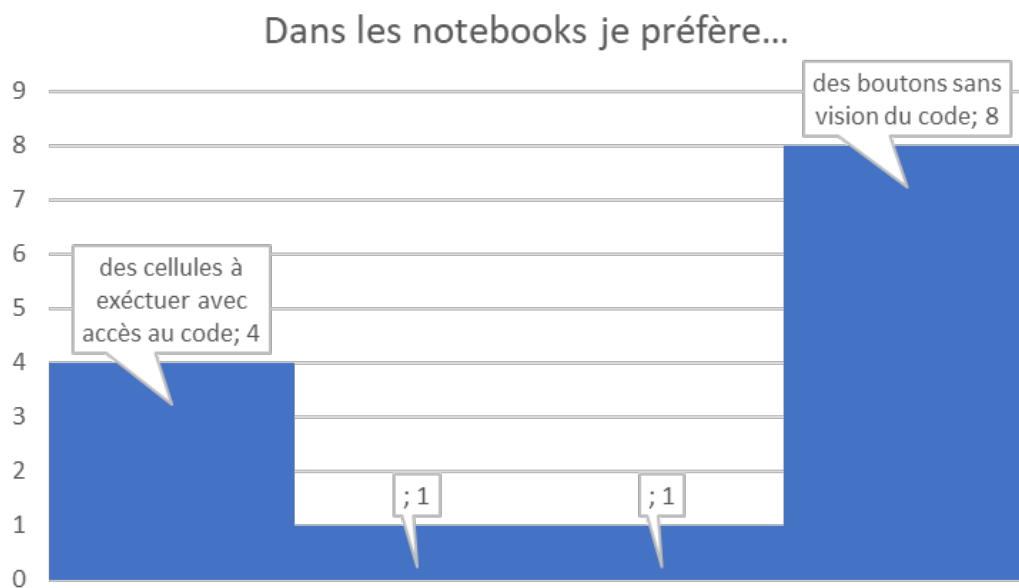
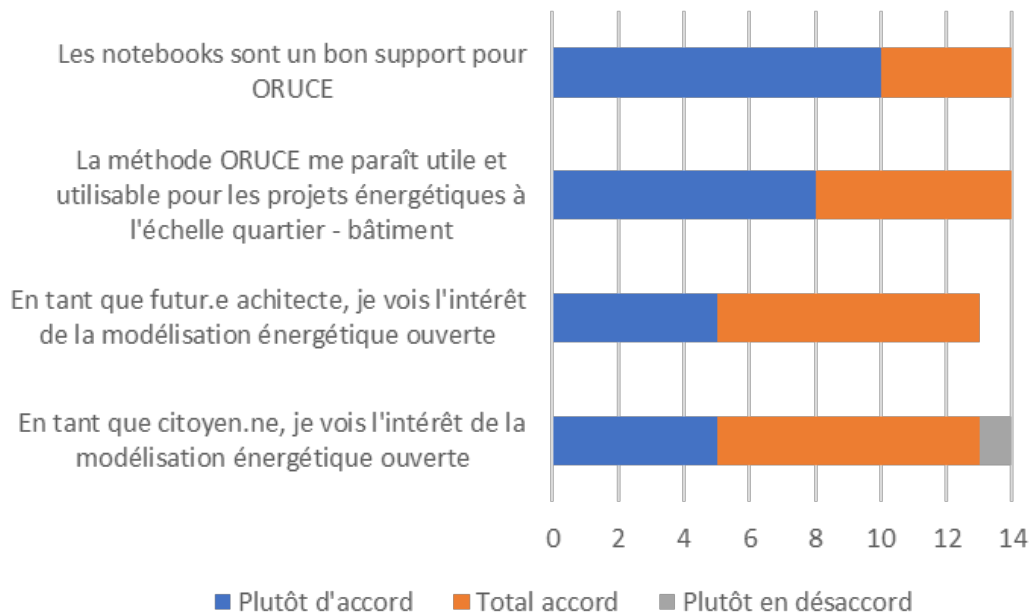


Figure IV.22 : Résultats d'enquête suite au cours avec les étudiants de l'ENSAG - a. appréciation de la méthode ORUCE b. appréciation du format des notebooks.

Dans la première partie des retours (Figure IV.22.a), on constate que les étudiants sont globalement **favorables** à l'utilisation des notebooks comme supports, et perçoivent l'intérêt et l'utilisabilité de la méthode. Les résultats de la Figure IV.22.b soulignent quant à eux une division dans la **forme de l'objet** notebook, avec une préférence majoritaire pour un notebook « interface » où le code est invisibilisé en faveur d'interface type curseur et boutons pour exécuter le modèle. D'autres sont favorables au maintien de cellules à exécuter comprenant du code.

En se basant sur ces premiers retours d'un public non-expert du domaine de la modélisation énergétique, la méthode ORUCE et son implémentation sous forme de notebooks semblent bien adaptées comme supports pédagogiques. On notera bien que, d'une part le notebook initial de recherche a été adapté au public, et d'autre part les étudiants n'ont pas été laissés en autonomie pour son utilisation.

IV.3.5. ORUCE comme support de médiation auprès de collectifs citoyens

IV.3.5.1. *Exploration de scénarios pour l'autonomie énergétique d'un système embarqué : le spectacle ONIRI 2070*

Comme évoqué dans le Chapitre III, la méthode ORUCE comme support de médiation n'a pas été complètement conceptualisée dans sa forme. Toutefois, des expériences en ont été réalisées, avec le projet ONIRI 2070.



Figure IV.23 : Images du spectacle ONIRI 2070. Crédit : Arno Villenave, Organic Orchestra, tous droits réservés.

ONIRI 2070 est un spectacle d'arts vivants et numériques de la compagnie Organic Orchestra [355]. Il porte des valeurs de respect de l'environnement et de l'humain sur les thématiques de la mobilité, de l'autonomie et des arts. Dans sa forme, le spectacle cherche à être sobre en consommation d'énergie (moins d'1 kWh dépensé par représentation) et de matière avec des systèmes low-tech. Le système énergétique doit être autonome pour pouvoir se représenter en zones isolées, et uniquement alimenter via des énergies renouvelables. En outre, le spectacle implique directement le citoyen dans le spectacle avec un travail documentaire pour construire le récit prospectif de la cité ONIRI, et implique également des chercheurs via des collaborations art-sciences techniques et humaines et sociales (architecture notamment).

La Figure IV.24 présente le système énergétique associé à la consommation vidéo (la moitié du système complet), dans le formalisme propre à OMEGAAlpes. Le système technique complet, intégrant également les systèmes de mesure, est présenté dans l'Annexe 18.

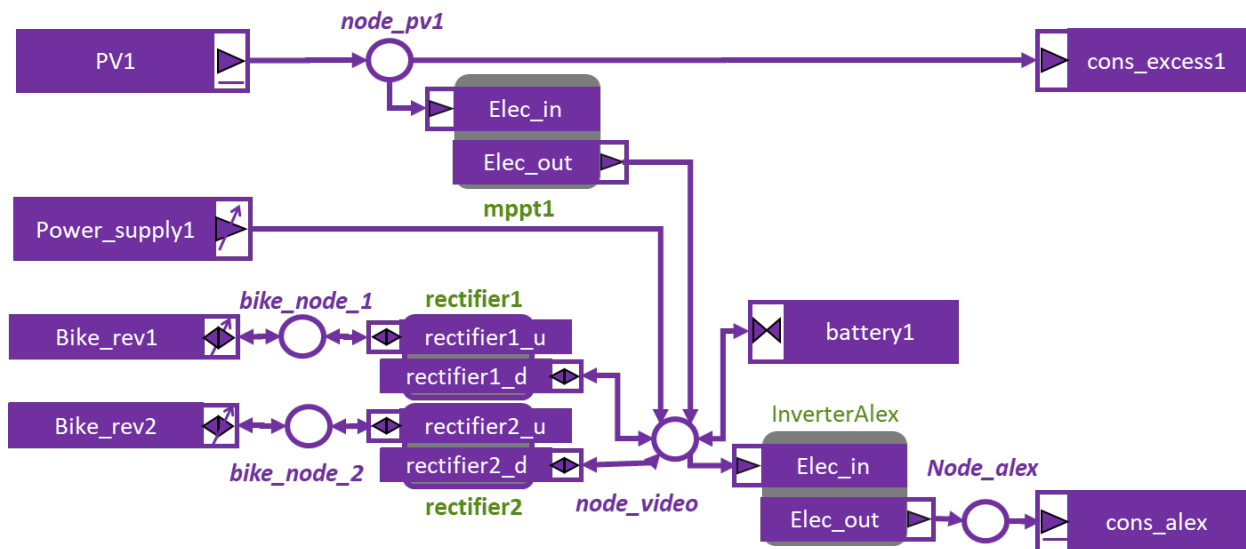


Figure IV.24 : Système énergétique du spectacle ONIRI, selon le formalisme OMEGAAlpes. Source : auteur

Le système énergétique complet comprend :

- 2 systèmes de production PV à déployer en amont du spectacle *PV1* avec le redresseur et régulateur MPPT (pour *Maximum Power Point Tracker*) associés, et également une consommation associée permettant d'absorber la production excédentaire (*cons_excess1*),
- Un branchement de secours au réseau électrique, utilisable la nuit uniquement *Power_supply1*
- 4 vélos à assistance électrique, avec moteur réversible pouvant servir de générateur, *Bike_rev1* et *Bike_rev2* avec redresseurs associés,
- 2 batteries Lithium-ion de récupération *battery1*,
- 2 sources de consommation et les onduleurs associés : le système vidéo *cons_alex* et le reste du spectacle (son, lumières, auxiliaires).

Un modèle OMEGAAlpes a été réalisé pour ce système énergétique, avec comme objectif initial le dimensionnement des batteries, puis la minimisation du pédalage et de l'utilisation du réseau électrique. Le modèle permet d'explorer différents scénarios énergétiques correspondant à des journées types de représentation : production – stockage – consommation dans la tournée en fonction de contraintes techniques (e.g. ensoleillement pour le PV, utilisation de l'assistance électrique, ...) et organisationnelles. Ce modèle accompagne dans le dimensionnement et l'opération d'un système le plus adapté aux besoins, mais permet aussi d'anticiper les meilleurs moments pour la production renouvelable. Oniri 2070 offre à OMEGAAlpes un cas d'étude qui permet d'anticiper les contraintes de petites solutions autonomes et mobiles liées aux interventions d'urgences ou d'assistance en zone précaire par exemple.

Comme dans le cas du LNCMI, ce modèle a été intégré à un notebook [I] de médiation, qui a notamment été utilisé en amont d'une première représentation de rodage dans le cadre de la

biennale Arts-Sciences Experimenta. Le notebook présente une interface graphique pour jouer sur les paramètres du scénario énergétique :

- consommation des éléments du spectacle,
- horaires et durée des balances et de la représentation,
- profil de production et puissance crête des panneaux PV,
- ou encore usage des vélos générateurs.

Les résultats présentent l'évolution du niveau de charge des batteries et les flux d'énergie sur une journée. Ce notebook a été pris en main à distance par l'équipe d'Organic Orchestra avec un simple support asynchrone par mail. Même si la forme n'était pas idéale du fait des limites des interfaces graphiques sur Jupyter Notebook, le format semblait malgré tout adapté dans ce cas pour des itérations entre la compagnie artistique et l'équipe de développement. Un intérêt particulier du notebook était ici de faire percevoir les entrées et résultats du modèle aux utilisateurs, et de faire évoluer le modèle et même l'outil OMEGAAlpes à partir de leurs retours.

Outre l'utilisation du notebook avec la compagnie artistique, le spectacle ONIRI 2070 est lui-même un objet de médiation sur les questions énergétiques. L'enchevêtrement des aspects artistiques, de récit d'anticipation collaboratif, et de défi technique alimente les imaginaires en permettant l'exploration d'une variété de scénarios futurs, et vient interroger les spectateurs sur les usages énergétiques personnels et collectifs.

IV.3.5.2. Lien aux collectifs citoyens sur la question de l'autoconsommation

Enfin, la médiation peut évidemment prendre la forme de rencontre entre acteurs. De telles rencontres ont été développées au cours de la thèse, notamment avec des ateliers autour de l'autoconsommation PV entre le G2Elab et le collectif citoyen Energ'Y Citoyennes²⁰. Energ'Y Citoyennes est une société locale par actions simplifiées (SAS) créée par des habitants de la métropole grenobloise dans le but de produire de l'énergie issue de sources renouvelables, et de promouvoir la maîtrise de l'énergie, en associant les habitants à des collectivités et des acteurs de la transition énergétique. L'autoconsommation est ainsi un sujet d'interrogation pour ce collectif, et j'ai initié un cycle d'ateliers avec le G2Elab en mars 2022 avec pour objectifs :

- De présenter des résultats de recherche autour de l'autoconsommation PV, les impacts environnementaux et la maîtrise de l'énergie (notamment issus des travaux présentés dans la section IV.3.3),
- De discuter de l'intérêt de ces travaux pour le collectif, et la pertinence de formes de partage telles que les notebooks,
- De manière générale, d'entretenir un lien et des échanges sur la thématique entre le laboratoire de recherche et les bénévoles actifs intéressés du collectif.

²⁰ Site de Energ'Y Citoyennes <https://energy-citoyennes.org/>

Le prochain échange prendra la forme d'une partie de Sous-Tension²¹, un jeu sérieux (*serious game*) sur la thématique de l'autoconsommation développé dans le cadre de Eco-SESA, que j'ai participé à développer.



Figure IV.25 : Image d'une partie du jeu sérieux Sous-Tension. Source : Eco-SESA, tous droits réservés.

²¹ Serious games Eco-SESA : <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/scientific-production/serious-game/serious-games-825015.kjsp>

IV.4. Bilan et perspectives

Ce chapitre présente différents cas d'étude sur deux sujets de prégnants de la transition énergétique :

- La **chaleur fatale**, avec le projet de valorisation des calories des aimants du LNCMI. Des méthodes de replanification et gestion de la température sont proposées pour améliorer les indicateurs énergétiques et exergétiques, et des formats de médiation sont présentés auprès d'acteurs de la recherche, d'opérateurs énergétiques et de collectivités locales.
- L'**autoconsommation PV**, avec les arbitrages entre degrés d'autonomie et émissions de GES. Des formats et matériels pédagogiques et de médiation sont également présentés sur cette base entre collectifs citoyens et acteurs de la recherche.

Chacun des cas d'études souligne des avantages de la modélisation énergétique ouverte comparée aux approches fermées, ainsi que les intérêts de la méthode ORUCE pour comprendre, adapter et comparer les études énergétiques. Les cas d'étude soulignent également l'importance des moyens déployés afin de rendre les études et résultats **accessibles** à la compréhension pour différents publics :

- L'**ouverture** du processus de modélisation énergétique pour la recherche et le développement de projets énergétiques,
- Les échanges et l'accompagnement autour de **supports adaptés pour la pédagogie et la médiation**. Le notebook apparaît comme adapté à des usages en recherche et enseignement supérieur, et insuffisant si utilisé comme seul support de médiation.
- Ou encore la mobilisation de **procédés ludiques et artistiques** pour toucher à l'émotion et alimenter les imaginaires.

De même, les moyens déployés pour rendre les résultats **reproductibles** vont dépendre des publics et objectifs visés. Une reproductibilité des résultats (Figure III.9) pour du matériel supplémentaire de recherche permet notamment d'assurer la pérennité du processus d'obtention des résultats. Elle peut toutefois s'avérer coûteuse en temps et pas nécessairement alignée avec le travail et les compétences des publics de recherche, là où une reproductibilité des méthodes garantie malgré tout une forme de transmission des travaux sur la durée et d'acculturation.

Pour conclure les cas d'études illustrent ici les intérêts de la modélisation énergétique ouverte : la méthode ORUCE peut servir de guide mais ne doit pas enfermer dans un formalisme figé. En outre, des formats alternatifs tels que des fresques, ateliers ou jeux sérieux doivent être mis en place pour de la médiation.

Le Tableau 11 présenté ci-après présente comment les trois objectifs de la méthode ORUCE, *comprendre, adapter, comparer*, sont incarnés sur les cas d'étude de valorisation de chaleur fatale et d'autoconsommation PV.

	Valorisation de chaleur fatale	Autoconsommation PV
Comprendre	<ul style="list-style-type: none"> - Les contraintes liées à la valorisation de chaleur fatale sur un réseau de chaleur, et les potentiels de chaleur fatale théoriques et techniques. - L'accès et le traitement relatif aux données dans un projet multi-acteur. - L'organisation et le pilotage d'un système de valorisation de chaleur fatale avec PAC et stockage. - Les différents indicateurs de résultats, notamment énergétiques & exergetiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - La gestion de données d'ensoleillement, de consommation résidentielle et d'émissions de GES - Le compromis entre degrés d'autonomie et émission de GES - Les concepts clés dans l'autoconsommation : composantes de l'ensoleillement et productible PV associé, différences d'indicateurs - Les variables de dimensionnement et d'installation : surface, capacité de stockage, orientation et inclinaison.
Adapter	<ul style="list-style-type: none"> - Choix des données : de dissipation de chaleur, de consommation sur le réseau, de température extérieure - Choix du dimensionnement du système de valorisation. - Choix des hypothèses : loi d'eau, zone et périmètre d'injection, dynamique d'émissions de GES 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix des données selon le pays : consommation, mix énergétique, ensoleillement - Choix d'objectifs : SCF, LCF ou émissions de GES, - Choix des bornes des variables - Choix des technologies PV et batteries
Comparer	<ul style="list-style-type: none"> - Autres indicateurs de résultats (économiques, environnementaux) - Autres modèles (physique fine type Modelica). 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de réduction de période ou de modèles - Méthode et modèles d'optimisation : linéaire ou non-linéaire, ...

Tableau 11 : Illustration des intérêts de la méthode ORUCE sur les cas d'étude de chaleur fatale et d'autoconsommation. Source : auteur.

Je notifie des avantages supplémentaires suite à l'application de la méthode ORUCE sur les cas d'étude traités et présentés ici :

- Tout d'abord une **rigueur** et compréhension de fond sur le processus de modélisation énergétique. Préparer l'ouverture du processus dès ses premières étapes force à une saine exigence dans la connaissance des sources de données, la justification des hypothèses et le choix des méthodes, et préserve de mauvaises pratiques telles que la

sélectivité dans la collecte, l'analyse et l'interprétation de données (voir les *Figures 1* de Huebner et al. [262] et Munafò et al. [116])

- Ensuite un **changement de paradigme** dans les principes et pratiques de recherche. Là où le financement de la recherche par projet, de plus en plus répandu, instaure une compétition entre équipes travaillant sur les mêmes sujets, les pratiques de modélisation énergétique ouverte invitent les équipes explorant des sujets proches à collaborer, notamment via des contributions sur les outils ou des reproductions des cas d'étude. Sans supprimer les spécificités de chaque laboratoire, cela permet d'avancer de manière collective sur le sujet d'importance qu'est la transition énergétique, à l'image de la communauté openmod [88]. En outre, cette collaboration permet d'identifier les manques et biais dans les processus, visant une amélioration continue. On notera que les modes de financements et d'incitations pour ce type de collaborations sont encore balbutiants [51].
- Enfin, il est **gratifiant** de savoir que les travaux que l'on développe seront reproductibles, notamment à l'issue d'un travail de thèse de 3 ans où le départ du doctorant rend bien souvent la réutilisation de ses travaux difficile.

Concernant les perspectives de ce chapitre, l'importance des moyens déployés pour l'accessibilité rappelle une perspective de la méthode ORUCE (section III.4), où le format *médiation* reste à affiner. De même, l'intérêt de la méthode ORUCE comme guide de bonnes pratiques sur les deux cas d'étude rappelle la perspective concernant l'acculturation nécessaire des acteurs de l'énergie aux pratiques de modélisation énergétique ouverte. Les perspectives du projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI sont l'implémentation d'un démonstrateur sur une échelle plus restreinte pour la valorisation : celle du site du CNRS. Cette mise à l'échelle permet une gestion facilitée des données et systèmes techniques relatifs à la consommation de chaleur, et nécessitera une adaptation des processus de modélisation déjà développés. Pour l'autoconsommation, des perspectives consistent en une modélisation plus fine des batteries et de leurs impacts (e.g. la considération de batteries de seconde vie), mais également la prise en compte de l'évolution des mix énergétiques et consommation dans les années à venir. Enfin, concernant la mise à disposition de processus de modélisation énergétique ouverte, les Annexe 15 et Annexe 16, ainsi que les Matériels supplémentaires présentent la variété de cas d'étude développés autour des deux thématiques. Aussi pour rendre l'ouverture et le partage plus effectif, la mise à disposition d'un catalogue de cas d'étude, données et modèles dans un format accessible et mis à jour semble nécessaire. Une plateforme numérique ouverte pourrait jouer ce rôle.

Chapitre V

Une plateforme de modélisation énergétique ouverte et collaborative au service des acteurs de la transition : COFFEE (Collaborative Open Framework For Energy Engineering)

« Dans la vie, nous n'apprenons que des autres » Roman Frayssinet

SOMMAIRE

Chapitre V	Une plateforme de modélisation énergétique ouverte et collaborative au service des acteurs de la transition : COFFEE (Collaborative Open Framework For Energy Engineering)	149
	Résumé du chapitre.....	150
V.1.	Des connaissances utiles, utilisables et utilisées ?.....	151
V.2.	Plateformes collaboratives pour la modélisation énergétique ouverte	151
V.2.1.	Définition et caractéristiques principales.....	151
V.2.2.	Inventaire des plateformes de modélisation énergétique ouvertes	152
V.2.3.	Historique des travaux de plateforme ouverte au G2Elab	157
V.3.	COFFEE : Collaborative Open Framework For Energy Engineering	158
V.3.1.	Le concept COFFEE : une plateforme collaborative et ouverte pour les acteurs de l'énergie	158
V.3.1.1.	Présentation des éléments constitutifs de COFFEE.....	158
V.3.1.2.	Formulaires de contribution dans COFFEE.....	160
V.3.1.3.	Fonctions de socialisation.....	163
V.3.2.	Une enquête centrée sur l'expérience utilisateur pour la conception de COFFEE	164
V.3.2.1.	La méthode d'enquête CAUTIC.....	164
V.3.2.2.	Résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE.....	166
V.3.2.2.a.	Résultats généraux de l'enquête CAUTIC	166
V.3.2.2.b.	Résultats de l'enquête CAUTIC par profils utilisateurs	166
V.3.2.2.c.	Recommandations pour le développement de COFFEE.....	167
V.3.2.3.	Croisement des résultats d'enquête	169

V.3.2.4.	Discussion des résultats d'enquête	170
V.3.3.	Scénarios d'usage pour l'utilisation de COFFEE	170
V.3.3.1.	Scénarios d'usage par communauté d'acteurs	170
V.3.3.2.	Scénarios d'usage systémique.....	173
V.3.4.	La plateforme COFFEE dans un cadre constructiviste	175
V.3.5.	Du concept à l'implémentation de COFFEE.....	175
V.3.5.1.	Différencier le concept de la solution déployée pour la plateforme COFFEE 175	
V.3.5.2.	Premières implémentations de la plateforme COFFEE au G2Elab	176
V.4.	Bilan et perspectives.....	180

Résumé du chapitre

Ce chapitre présente les intérêts des plateformes collaboratives en ligne dans le domaine de l'énergie, en mettant l'accent sur les pratiques ouvertes de modélisation énergétique. Il introduit COFFEE, un concept de plateforme de modélisation énergétique qui vise à rendre les études et les ressources associées accessibles aux parties prenantes. Une enquête qualitative sur l'expérience utilisateur a été menée pour qualifier l'expérience utilisateur de la plateforme, et les résultats de l'analyse ainsi que les recommandations sont présentés. Enfin, des scénarios d'usages ainsi qu'un premier exemple d'implémentation permettent de présenter une application du concept développé.

V.1. Des connaissances utiles, utilisables et utilisées ?

Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, la prise en compte des acteurs humains allant des concepteurs aux utilisateurs, en plus des pratiques de modélisation énergétique ouverte, sont essentielles lors des phases de conception et de pilotage de systèmes énergétiques. Les travaux menés et présentés jusqu'ici ont permis de mettre en forme des cas d'études de telle sorte à ce qu'ils puissent être utilisés comme des objets d'échange et de collaboration. Autrement dit, de rendre accessible aux acteurs humains les savoirs d'un scénario énergétique. Mais comment rendre accessible une multitude de scénarios ? Plus largement, comment faire en sorte que le maximum de connaissances liées à la modélisation énergétique ouverte soient utilisables, utiles et utilisées ? Et comment inviter différents publics à collaborer autour de celles-ci ? Les plateformes collaboratives de modélisation énergétique ouverte peuvent permettre de répondre à ces questions.

Dans ce chapitre, nous commençons par définir et analyser les plateformes de modélisation énergétique ouverte existantes. Nous présentons ensuite le concept et les caractéristiques de la plateforme COFFEE, que nous affinons grâce à une enquête centrée utilisateur. De premières pistes d'implémentation sont ensuite présentées.

V.2. Plateformes collaboratives pour la modélisation énergétique ouverte

V.2.1. Définition et caractéristiques principales

Une réelle diversité existe dans les infrastructures de la science ouverte, comme détaillé dans le point II.9. de la Recommandation de l'UNESCO sur une science ouverte [48]. En particulier, les plateformes collaboratives permettent à des acteurs d'un domaine de coopérer et de partager leurs travaux ainsi que leurs idées et expérience. Dans le monde de la recherche, ces plateformes collaboratives sont généralement des services en lignes pouvant aller d'environnements de recherche virtuels (ou *VRE* pour *Virtual Research Environment*) comprenant des fonctionnalités pour faciliter le partage et la collaboration (e.g. répertoires de données, d'outils, ressources de calculs), jusqu'à des outils spécifiques qui permettent aux chercheurs d'explorer un aspect particulier de leur recherche, qu'ils soient dispersés géographiquement ou non [61]. Tout comme l'ouverture de la modélisation énergétique évoquée dans le Chapitre I, l'ouverture des plateformes fait face à des défis culturels, organisationnels et liés aux procédures tels que la peur de présenter des travaux en cours [356].

Dans le domaine de l'énergie, les plateformes ouvertes collaboratives peuvent permettre d'améliorer la transparence et la reproductibilité des études [87] en banalisant les principes de modélisation énergétique ouverte, et en facilitant le transfert de connaissances. Ces plateformes peuvent répondre à des problématiques concrètes des équipes de recherche, comme par exemple le manque de pérennité de méthodes et outils suite au départ de leur développeur. Elles représentent en outre des points d'entrée directs pour les acteurs de l'énergie et peuvent être reliées entre elles. Les descriptions des modèles énergétiques peuvent être ajustées dynamiquement et être utilisées pour du filtrage et de la comparaison [357].

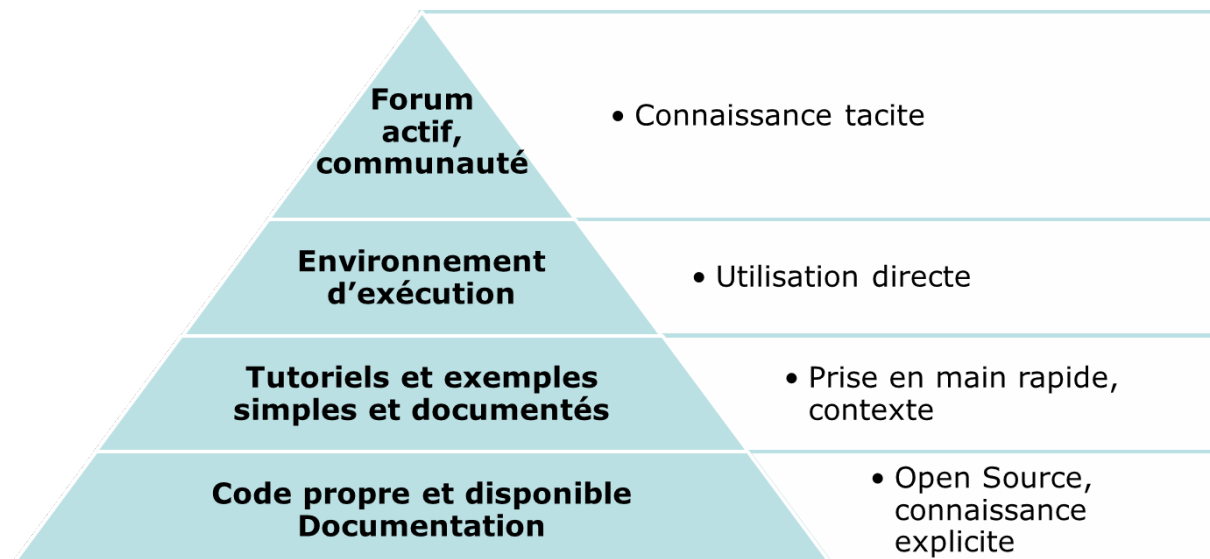


Figure V.1 : Fonctionnalités principales pour la diffusion d'une plateforme de modélisation énergétique ouverte. Source : auteur.

La Figure V.1 présente les fonctionnalités principales pour la diffusion d'une plateforme de modélisation énergétique ouverte. Des outils open source documentés et versionnés constituent une base, là où des tutoriels vont permettre de rapidement saisir les fonctionnalités et utilisations des modèles [87]. Des exemples documentés, incluant le contexte et le processus de traitement d'un cas d'étude depuis les données brutes jusqu'aux résultats et interprétations, améliorent la capitalisation des connaissances à travers la prise en compte et la compréhension du contexte par les concepteurs et utilisateurs. Un environnement d'exécution permettra un usage direct des outils [289]. Enfin des moyens de socialisation synchrones (i.e. permettant des échanges en temps réel) ou asynchrones (e.g. 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. Ainsi ils permettent de capter et diffuser aussi bien les connaissances explicites que tacites [358]. De telles plateformes permettent de favoriser 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* [88,98].

V.2.2. Inventaire des plateformes de modélisation énergétique ouvertes

De nombreuses plateformes ouvertes et collaboratives existent. Parmi les plus connues, on peut par exemple citer l'Open Science Framework (OSF) développée et maintenue par le Center for Open Science, une application web open-source pour stocker de manière centralisée et ouverte les différentes étapes des processus de recherche [359]. Plus récemment, la plateforme JOGL (Just One Giant Lab) créée en 2017 s'est fortement développée et a mobilisé de nombreux acteurs lors de la crise Covid-19 avec l'initiative OpenCovid19 [360]. Ou encore dans le domaine de l'astronomie, en avance sur les questions d'ouverture, la plateforme européenne ESCAPE qui regroupe une infrastructure de données, des répertoires de code et documentation pour outils ouverts, des publications et cours, et rassemble toute une communauté avec des évènements, un forum et des actions de sciences participatives [361].

Dans le domaine de l'énergie, l'objectif que nous poursuivons est de rendre les ressources issues de la recherche en modélisation énergétique ouvertes et accessibles, avec une utilisation simplifiée, et en lien avec les différentes parties prenantes. A partir de cet objectif et de la variété de plateformes existantes, nous pouvons dégager différentes fonctionnalités non-exclusives de plateformes :

- **Bases de données**, faisant un inventaire de données, outils ou encore d'articles et de ressources autour de l'énergie.
- **Suites d'outils**, partageant des outils de modélisation énergétique issus de la recherche.
- **Services web**, permettant de réaliser des études directement en ligne.
- **Créations de lien**, avec des fonctionnalités telles que des forums permettant de rassembler des communautés d'acteurs de l'énergie.

En se basant sur ces catégories et sur une recherche documentaire, un inventaire des principales plateformes de modélisation énergétique ouverte est présenté dans le Tableau 12. Treize plateformes sont présentées, et la fonctionnalité dominante est grisée.

Nom - acronyme	Institution – site web	Description	Base de données	Suite d'outils	Service en ligne	Communauté
Building and Energy Simulation, Optimization and Surrogate-modelling – BESOS [362]	Energy in Cities group, University of Victoria - besos.uvic.ca/	Composants logiciels modulaires - Analyse intégrée des bâtiments et systèmes énergétiques.	-	Intégration de modules pour l'optimisation, la simulation et le <i>surrogate modelling</i> .	Utilisation de notebooks en ligne sur inscription.	-
Energydata.info	World Bank Group - energydata.info	Données ouvertes et analyses pour le secteur de l'énergie.	Jeux de données énergétiques disponibles pour différentes régions	Analyses liées à des outils de modélisation énergétique	Applications d'analyse énergétique & visualisations	-
European Energy Efficiency Platform – E3P	European Commission Joint Research Centre - e3p.jrc.ec.europa.eu/	Facilitation d'actions d'efficacité énergétique des échelles nationales à locales - ressources thématiques.	Collecte et analyse de données, partage de ressources documentaires et wiki	-	-	Partage d'expérience sur les pratiques, benchmark et réseau, groupes de travail et d'événements
Energy Modelling Platform for Europe – EMP-E	European Union projects - www.energymodellingplatform.org/	Coopération entre modélisateurs et décideurs européens - Modèles et idées pour les scénarios revus par les pairs. Déclinaisons mondiales	Répertoire de projets en cours et comptes rendus des événements passés.	-	-	Fil d'actualité, événements et conférences
Integrated Assessment Modelling Consortium - IAMC	www.iamconsortium.org/	Groupes de travail et ressources sur les modèles d'évaluation intégrée - Wiki pour la présentation et la comparaison de modèles.	Base de données des projets, modèles, scénarios, outils et publications	Nombreux outils accessibles depuis la base de données	Nombreuses applications accessibles depuis la base de données	Différentes institutions animées dans des événements et groupes de travail
Linux Foundation Energy – LF Energy	The Linux Foundation - www.lfenergy.org	Numérisation du système électrique - Thématiques de marché et relation client, gestion des réseaux électriques et infrastructures, acquisition, contrôle et gestion de données.	Base de données des différents projets et nombreuses ressources associées rassemblées sur un wiki	Outils accessibles par projet	-	Centrée sur la communauté avec le fonctionnement par projets, événements, actualités et réseaux sociaux
Modelling tools for sustainable development – un-modelling	Nations Unies - un-modelling.github.io/	Modélisation analytique - Interactions entre les différentes dimensions du développement durable.	Base de données d'outils et de projets par pays, ainsi que plusieurs modules de cours	Modèles d'évolution climatique, socio-économie, systèmes énergétiques & électrification	Possibilité d'explorer les modèles directement en ligne	Organisation d'ateliers

Nom - acronyme	Institution – site web	Description	Base de données	Suite d'outils	Service en ligne	Communauté
Open Axial Flux Permanent Magnet - Open AFPM	Rural Electrification Research Groupe - https://www.openafpm.net/	Conception de petites éoliennes fabriquées localement - Outils pour valider des performances d'une géométrie, ou concevoir les dimensions d'un générateur .	-	Logiciel d'analyse éléments finis Finite Element Method Magnetic (FEMM) et autres outils dédiés	Utilisation des outils en ligne si connecté	Forum en ligne et réseau WISIONS avec ressources et événements
Open Energy Monitor	https://openenergymonitor.org/	Outils de mesure, modélisation et analyse sur différentes technologies, en lien avec des composants physiques.	Guide d'utilisation et cours théoriques et pratiques, wiki	Variété d'outils logiciels et hardware proposé par thématique et technologie.	-	Communauté active dans un forum
Open Energy Modelling Initiative – openmod [88]	https://openmod-initiative.org/	Communauté d'acteurs de la modélisation énergétique ouverte provenant de différentes institutions de recherche autour du monde.	Wiki avec bases de modèles et données énergétiques et ressources pédagogiques	-	-	Organisation d'évènements, liste de courriels et plateforme de discussion très active
Open Energy Platform – OEP	https://openenergy-platform.org/	Interface web avec bases de données - Ontologie pour le domaine de la modélisation énergétique	Base de données thématique avec lien aux hypothèses et au code source, fiches d'information outils, modèles et scénarios.	Intégrée à l'Open Energy Family, une collection d'outils et d'informations réparties en différents projets	-	Participation et contribution sur la plateforme et github
Open Source Energy Modelling System – OSeMOSYS [363]	KTH Royal Institute of Technology - http://www.osemosys.org/	Modélisation pour l'évaluation intégrée à long terme et la planification énergétique - Échelles mondiale jusqu'à celle de villages.	Ensemble de modèles et jeux de données, et nombreuses ressources pédagogiques	Outil de planification énergétique, avec différents scénarios et applications	Les interfaces doivent être installées ; résultats interactifs disponibles en ligne	Évènements et forum d'échanges, en plus de Github pour contribuer et échanger
webservice-energy	Mines ParisTech / ARMINES & équipe SoDa - http://www.webservice-energy.org/	Données et applications dans le domaine des énergies renouvelables et de l'environnement, notamment autour du solaire PV. Certaines fonctionnalités non open-source.	Catalogue de ressources issues de différents projets, et services en ligne et jeux de données	Différents outils et applications	La majorité des outils disposent d'interface pour être directement utilisés en ligne	-

Tableau 12 : Inventaire des plateformes de modélisation énergétique ouverte par ordre alphabétique, avec catégories de fonctionnalités (fonctionnalité dominante grisée). Source : auteur.

La variété de plateformes présentées dans cet inventaire nous permet de tirer un bilan de l'existant :

- Les **bases de données** peuvent proposer des données énergétiques quand elles ne sont pas externalisées sur un site dédié, mais également d'autres ressources telles que des publications et supports pédagogiques. Des catalogues sont souvent utilisés pour présenter l'éventail de données, outils, modèles et scénarios énergétiques.
- Concernant les **outils**, les plateformes peuvent donc en proposer un catalogue, ou bien être consacrées et focalisées sur un outil de modélisation précis. Ces outils recouvrent différentes approches, et secteur, avec la plupart du temps des échelles spatiales larges allant de la région à l'échelle continentale. Les outils peuvent également être complémentaires de ressources matérielles spécifiques, comme pour l'Open Energy Monitor par exemple.
- Sur les 13 plateformes présentées, seule la moitié d'entre elles disposent de fonctionnalités de réalisation d'**études en ligne**, allant de l'utilisation de notebooks à des interfaces dédiées.
- Enfin la **création de lien** passe aussi bien par des échanges synchrones lors d'ateliers et événements qu'asynchrones avec des outils allant de la simple liste de mails jusqu'au forum, en passant par les contributions sur des plateformes de versionnages de code telles que Github.

➔ L'inventaire présenté nous permet d'identifier **un manque à des échelles spatiales plus réduites, favorisant les échanges synchrones et les collaborations entre acteurs de l'énergie autour de projets locaux.**

Les plateformes sont pour la plupart proposées par des projets publics ou des équipes de développement spécifiques. Or comme on l'a vu dans le Chapitre I, la modélisation énergétique ouverte bénéficie aussi bien aux chercheurs dans le domaine de l'énergie qu'à la société en général.

➔ Aussi, un concept de plateforme pour l'**ouverture systématique** des travaux de recherche, notamment aux **échelles locales**, et prenant en compte ses **utilisateurs** apparaît comme nécessaire.

On notera que certains types de plateformes sont hors du périmètre de cet inventaire, mais présentées brièvement ci-dessous avec des exemples :

- Les plateformes ne comprenant pas de modélisation énergétique, et notamment les plateformes de données seules :
 - Des plateformes publiques comme la plateforme de données liées aux réseaux de transport d'électricité européens (l'ENTSOE transparency platform²²), ainsi que des déclinaisons nationales avec eCO_2mix ²³ pour RTE et Open Data Réseaux

²² <https://transparency.entsoe.eu/>

²³ <https://www.rte-france.com/eco2mix>

- Énergies²⁴ en France, et l'Open Data portal²⁵ de UK Power Networks au Royaume-Uni, qui comprennent de nombreux services en plus du partage et de l'affichage de données.
- Les plateformes de collectivités locales, comme celle de la métropole nantaise²⁶.
 - Des sites de partage de données spécialisés comme Open Power System Data²⁷ dédiée aux chercheurs en modélisation énergétique, ou bien la section énergie de Our World in Data²⁸.
 - Les plateformes et services énergétiques ne proposant pas une majorité de contenus ouverts, tels que le service en ligne auticalsol²⁹, le réseau Energy Modelling Forum³⁰ ou le site et base de données associée de l'Agence Internationale de l'Énergie³¹.
 - Étant un domaine assez récent et en pleine expansion, certains projets de plateforme de modélisation énergétique ouverte sont en phase de développement et n'ont également pas été présentés en détail :
 - les projets européens en cours tels que WHY³², NAVIGATE³³, SENTINEL³⁴ ou openENTRANCE³⁵ dont le but même est le déploiement d'une plateforme ouverte et intégrée pour évaluer les voies de transition en Europe,
 - les projets nationaux tels que l'Energy Modelling Hub de l'UKERC au Royaume-Uni [37],
 - les projets de recherche tels que open_plan³⁶,
 - des projets à des échelles plus locales qui rassemblent des communautés, comme La Fabrique des Energies³⁷ qui est encore en préfiguration.

Aussi, cet inventaire n'est pas nécessairement exhaustif : la plupart des sites associés aux outils modélisation énergétique comme oemof, spine et OnSSET (Annexe 6) proposent également de nombreuses ressources. Ici seul celui très fourni de OsEMOSYS, qui comprend notamment des ressources pédagogiques, évènements et structure de gouvernance [363], a été cité.

V.2.3. Historique des travaux de plateforme ouverte au G2Elab

Le G2Elab dispose d'un historique de travaux autour du transfert de connaissance dans le domaine du génie électrique à au moins deux titres.

²⁴ <https://opendata.reseaux-energies.fr/pages/accueil/>

²⁵ <https://www.ukpowernetworks.co.uk/open-data-portal>

²⁶ <https://data.nantesmetropole.fr/explore/?q=énergie>

²⁷ <https://open-power-system-data.org/>

²⁸ <https://ourworldindata.org/energy>

²⁹ <https://auticalsol.ressources.ines-solaire.org/>

³⁰ <https://emf.stanford.edu/>

³¹ <https://www.iea.org/>

³² <https://www.why-h2020.eu>

³³ <https://www.navigate-h2020.eu/>

³⁴ <https://sentinel.energy/>

³⁵ <https://openentrance.eu/>

³⁶ <https://open-plan-tool.org/>

³⁷ <https://fabenergies.cc/>

D'abord avec la **plateforme DIMOCODE** (Diffusion Internet des MOdèles pour la Conception Optimale des Dispositifs Energétiques) [358], dont l'idée émerge en 2007 avant d'être déployée en 2011. Cette plateforme applique une approche épistémologique constructiviste [137] ainsi que les modèles de connaissances explicites et implicites [144] dans le génie électrique. Elle s'organise autour d'une bibliothèque de modèles, avec en outre une page d'accueil et une partie « bourse » pour mettre en relation modélisateurs et concepteurs. Si la plateforme se développe et rencontre une communauté d'utilisateurs, le projet s'interrompt en 2018 en raison d'une coupure de financements due à une redondance dans la solution logicielle utilisée pour la plateforme : celle-ci avait été externalisée faute de solution interne, avant d'être en concurrence quelques années plus tard avec une solution de l'université. Un transfert des contenus de la plateforme est envisagé mais n'aura pas lieu faute de moyens et en raison de la complexité de cette récupération. En bref, la plateforme disparaît en raison d'une obsolescence numérique et institutionnelle des solutions logicielles déployées.

En plus de ces travaux autour de DIMOCODE, les travaux autour de la modélisation énergétique ouverte au G2Elab avec le développement d'outils tels que OMEGAAlpes [188] puis NoLOAD [240], ont permis de développer des compétences autour du déploiement de **projets Open Source** et en particulier de modélisation énergétique ouverte.

Bénéficiant de cet historique autour des travaux de plateformes et outils, et en complément de la méthode ORUCE présentée dans le Chapitre III pour l'ouverture d'une étude énergétique seule, un concept de plateforme de modélisation énergétique ouverte et collaborative est aujourd'hui proposé avec COFFEE.

V.3. COFFEE : Collaborative Open Framework For Energy Engineering

V.3.1. Le concept COFFEE : une plateforme collaborative et ouverte pour les acteurs de l'énergie

V.3.1.1. Présentation des éléments constitutifs de COFFEE

COFFEE pour *Collaborative Open Framework For Energy Engineering* est un concept de plateforme collaborative en ligne, avec le double objectif de **créer du lien** ...

... **entre les fonctionnalités de modélisation énergétique ouverte** : COFFEE peut être vue comme une vitrine pour les laboratoires, afin qu'ils présentent leur recherche de manière ouverte et accessible auprès de différents publics.

... **entre les acteurs de l'énergie** : les publics cibles comprennent bien sûr les chercheurs et chercheuses, mais également les autorités publiques, les bureaux d'études ainsi que les collectifs citoyens engagés sur des projets de transition énergétique. Le concept de plateforme COFFEE se focalise sur l'expérience utilisateur et la collaboration locale et internationale entre acteurs. Ainsi la plateforme constitue également une porte d'entrée pour échanger avec des spécialistes de la modélisation énergétique et lutter contre l'asymétrie de savoirs.

POURQUOI ?

QUOI ?

Le cœur de COFFEE est une **bibliothèque de cas d'étude**, où chaque cas d'étude suit les principes de développement ORUCE avec le processus de modélisation ainsi que les éléments de contexte et les hypothèses. Cette bibliothèque de cas d'étude est pensée comme une manière intuitive d'accéder aux travaux de recherche. En outre, la cartographie des cas d'étude permet d'identifier les opportunités et manques à explorer.

COFFEE est une proposition simplificatrice qui joue un rôle d'ensemblier pour apporter cohérence et lisibilité aux différentes fonctions de la modélisation énergétique ouverte. Un diagramme de page d'accueil pour COFFEE est présenté Figure V.2. On y retrouve :

COMMENT ?

- une *Bibliothèque de cas d'étude* au centre de la plateforme,
- les bases et gestion de données (archétypales ou spécifiques) *Open data*,
- les outils et modèles *Open-source*,
- des publications et articles scientifiques accessibles en *Open access*,
- des fonctions de socialisation avec la présentation d'évènements et l'usage d'un *Forum* pour entretenir des échanges asynchrones à propos des cas d'étude eux-mêmes, de fonctionnalités spécifiques, ou encore de considérations générales autour de la transition énergétique,
- des étiquettes (ou *Tag*) permettant d'explorer les ressources de la plateforme par thématique ou terrain d'étude,
- des *Ressources* supplémentaires tels que des bonnes pratiques de science ouverte, des supports de cours ouverts, et plans de matériels libres (*open hardware*) dans le domaine de l'énergie, ainsi que le renvoi vers des contenus externes de l'écosystème de modélisation énergétique ouverte.
- Un encart « *A propos* » présente également la plateforme elle-même, ses acteurs, ainsi que les moyens d'explorer, d'échanger et de contribuer. Enfin, les *Actualités* et *Contacts* du site sont disponibles.



Figure V.2 : Diagramme de page d'accueil COFFEE. Source : auteur.

En plus de la bibliothèque de cas d'étude qui constitue le cœur de la plateforme, on retrouve les fonctionnalités identifiées dans la section V.2.2, présentée dans le Tableau ci-après. Le détail des formulaires de contributions et fonctions de socialisation sont explicités dans les sous-sections suivantes.

V.3.1.2. Formulaires de contribution dans COFFEE

COFFEE est une plateforme collaborative, avec une base de ressources ayant vocation à être enrichie. Comme évoqué dans la section II.2.2.2, des métadonnées comprenant une représentation claire et compréhensible des modèles peuvent considérablement améliorer la transparence, notamment dans le contexte interdisciplinaire et complexe de la transition énergétique [182]. De premiers exemples de métadonnées formalisées existent, avec le projet PLUME [113], ou encore les *fact sheets* de l'Open Energy Platform proposées par Hülk et al. [171].

Dans COFFEE, des formulaires spécifiques sont proposés pour contribuer aux différentes bases de ressources de la plateforme : cas d'étude, jeux de données, outils ou modèles énergétiques, ou encore terrains d'étude.

- Pour les **formulaires d'ajout de données**, les Open Energy Metadata³⁸ de l'Open Energy Platform sont directement utilisées : comme notifié par Wierling et al. [182], cette initiative est actuellement l'approche la plus complète en terme de métadonnées dans le domaine de l'énergie.
- Pour les **formulaires liés aux modèles et cas d'études** (Figure V.3), elles sont basées des fiches développées dans un cycle d'atelier du programme Eco-SESA, et les *fact sheets* de l'Open Energy Platform tout comme les travaux issus de l'Energy Modelling Platform in

³⁸ Répertoire github de l'OEMetadata : <https://github.com/OpenEnergyPlatform/oemetadata>

Europe [357] constituent des références ayant permis de les enrichir (voir l'Annexe 19 pour le détail et les formulaires terrains et outils).

- Des **formulaires terrains** sont également proposés. Par terrain, on entend un terrain d'étude, un living lab [364] comme le LNCMI, ou encore une thématique d'étude comme l'autoconsommation collective. Contrairement aux formulaires précédents qui permettent d'ajouter des ressources, les formulaires terrains sont utilisés comme étiquette (ou *tag*) à attacher à des ressources. Ils permettent pour toutes les ressources liées au terrain, de décrire son histoire, ses acteurs, ainsi que son contexte et ses enjeux. En outre, ce regroupement par étiquettes permet d'avoir accès et de capitaliser les ressources ouvertes liées à un terrain, sans avoir à solliciter de manière répétée l'acteur qui en est le détenteur originel. Les terrains sont une entrée intuitive alternative dans la plateforme par rapport aux seuls cas d'étude.

Saisie d'un nouveau cas d'étude

* Champs obligatoires

Nom *	Nom du cas d'étude	Enjeux	Enjeux/défis sociétaux
Tag	Lien vers les terrains	Secteurs	Vecteurs énergétiques
Description *	Brève description de l'histoire, du scénario du cas d'utilisation, les mécanismes d'interaction des acteurs.	Analyses	Énergétique, économique, environnementale, exergétique, social
Objectif	Objectif ou problématique du cas d'étude	Hypothèses	Hypothèses principales sur ce cas d'étude
Laboratoire *	Laboratoire(s) ayant travaillé sur ce cas d'étude	Nature du cas d'utilisation	Cas applicatif pour un outil, matériel supplémentaire, ...
Contact *	Nom et adresse mail du rédacteur de la fiche	Comment le cas d'utilisation est établi?	Méthode de modélisation, ...
Lien	Lien vers une ressource en ligne	Pourquoi le cas d'utilisation est-il établi?	Observation, aide à la compréhension, ...
Documents & données associés	Articles, rapports, présentation, données d'entrée / de sortie	Finesse modèle / représentation	Macro ou fin
Outils associés	NoLOAD OMEGAAlpes Autres...	Représentativité / Transposabilité	Spécifique / générique
Licence	Ouverte (préciser licence), freeware, commerciale	Phase d'utilisation	Analyse d'opportunités, faisabilité, pré-dimensionnement, ...
Acteurs	Acteur(s) primaires (impliqués), secondaires, type d'acteur	Échelle temporelle	Horizon, pas de temps
Terrain	Terrain(s) d'étude concret	Échelle spatiale	Matériaux --> continent
		Résultats	Principaux résultats
		Analyse incertitudes	Quantification ou qualification des incertitudes
			Envoyer

Figure V.3 : Exemple d'affichage pour le formulaire cas d'étude COFFEE. Source : auteur et V. Danguillaume.

Sur les différents formulaires, un compromis a été fait entre la facilité de remplissage et la granularité des informations. Aussi, de nombreux paramètres sont facultatifs. Les seuls paramètres obligatoires et donc minimums pour compléter un formulaire sont le titre, la description et le contact pour qu'à partir du catalogue de ressource, on dispose des éléments minimums de compréhension de la ressource et d'un contact. Il est important de noter que le développement de ces formulaires n'est pas arrêté mais dynamique et récursif par nature, selon les utilisations qui en sont faites. Des usages interdisciplinaires pourraient par exemple faire évoluer les formulaires vers la forme qu'avaient les fiches issues des ateliers Eco-SESA, là où un usage international ferait se rapprocher les fiches des travaux de l'Open Energy Platform.

Des moyens de contributions additionnels par rapport aux formulaires existent sur COFFEE : le lien vers une bibliographie collaborative Zotero pour ajouter des articles liés aux ressources, ainsi que des éléments de documentations contributifs sur les bonnes pratiques et l'écosystème présenté sous forme de pad³⁹ et intégré à la plateforme.

V.3.1.3. *Fonctions de socialisation*

Différents moyens de socialisation peuvent être mobilisés pour animer une plateforme de modélisation énergétique collaborative. On peut commencer par distinguer les socialisations synchrone et asynchrone.

Pour la socialisation asynchrone, on peut en citer plusieurs types à mobiliser selon l'usage et le public :

- Échanges liés au développement des modèles
 - Pourquoi ? Notifier des erreurs, ou proposer de nouvelles fonctionnalités et améliorations.
 - Pour qui ? Ces échanges sont directement liés au code et s'adressent aux développeurs des modèles énergétiques.
 - Exemple : *Issues* gitlab ou github, hébergées sur les mêmes plateformes que le code. Elles peuvent donc y faire référence, et notifier les développeurs directement.
- Échanges liés à l'utilisation des modèles
 - Pourquoi ? Résoudre des problèmes d'utilisation des outils qui ne sont pas nécessairement liés à des bugs mais à la prise en main de l'outil. Ils permettent en outre de capitaliser les questions fréquentes.
 - Pour qui ? Il s'agit d'échanges informels et rapides, mettant en lien les utilisateurs d'un outil.
 - Exemple : sections Foire Aux Questions (FAQ), ou *Stackoverflow*⁴⁰.
- Échanges liés à l'orientation stratégique du développement ou au domaine :
 - Pourquoi ? Discussion de fond liées au domaine (modélisation et énergie), ou concernant les orientations stratégiques de développement.
 - Pour qui ? La communauté liée aux cas d'étude, outils et données au sens large, touchant les acteurs de l'énergie utilisant les modèles énergétiques ou bénéficiant des résultats liés.
 - Exemple : Forums en ligne, tels que celui de la communauté openmod [98].

Dans COFFEE, ces trois types d'échanges sont assurés, notamment via le forum en ligne intégré à la plateforme. La plateforme peut notamment devenir un espace de collaboration et d'échanges pour la recherche du domaine, en plus de son rôle de lien entre Science et Société avec les autres acteurs de l'énergie.

³⁹ Par exemple, lien vers un pad présentant le choix d'une licence ouverte : https://pad.lescommuns.org/choix_licence_ouverte

⁴⁰ Le site stackoverflow référence les résolutions de problèmes de développement, tout outil et langage confondus : <https://stackoverflow.com/>

Concernant la socialisation synchrone, elle peut passer par des évènements en présentiels tels que des ateliers de développement (*hackathons*) et d'échanges, écoles d'été / d'hiver ou encore conférence. En distanciels, des webinaires et ateliers peuvent également être organisés. Des solutions de tchat permettent également des échanges informels et synchrones, mais ne permettront pas de capitaliser les échanges de manière lisible, contrairement aux échanges asynchrones mentionnés plus haut.

V.3.2. Une enquête centrée sur l'expérience utilisateur pour la conception de COFFEE

La plateforme COFFEE représente un des résultats de recherche de la thèse, dans le sens où elle sera la concrétisation des réflexions autour des espaces de science ouverte et des plateformes de modélisation énergétique ouvertes et collaboratives. Ainsi, au-delà de l'objet lui-même, c'est la compréhension des intérêts et limites de ce type de plateforme pour les différents publics qui sera valorisée. Afin de dépasser le bon sens de l'ingénieur – chercheur, et les enseignements issus de la littérature scientifique sur le sujet, un projet a été monté puis lancé en novembre 2020 avec la Fédération de Recherche "Innovation, Connaissances, Société" INNOVACS, dont le G2Elab fait partie. L'objectif étant de qualifier la pertinence de la plateforme imaginée auprès du public visé. En d'autres termes, s'assurer dès la phase de conception de la plateforme que COFFEE soit utilisable, utile, et utilisée. Ainsi, une enquête a été menée avec la méthode basée sur l'expérience utilisateur CAUTIC, afin d'évaluer la qualité d'usage perçue de la plateforme auprès des profils d'utilisateurs ciblés pour caractériser les axes d'amélioration du concept de plateforme COFFEE. Le rapport complet de cette enquête est disponible sous licence libre sur la plateforme HAL [365].

V.3.2.1. La méthode d'enquête CAUTIC

La prise en compte de l'utilisateur dès les premières phases de conception est essentielle pour répondre au mieux à ses besoins. Cela permet d'intégrer ses habitudes, avec des systèmes adaptés et pas trop complexes ayant plus de chance d'être adoptés [137]. Cela peut également favoriser les comportements énergétiques vertueux et être source d'innovation. La conception d'un objet tel que la plateforme COFFEE ne fait pas exception. La méthode CAUTIC, définie comme méthode de Conception Assistée par l'Usage, pour les Technologies, l'Innovation et le Changement [366], permet de faire remonter toutes les préoccupations de l'usage au plus tôt dans la conception des innovations. L'objectif de la méthode CAUTIC est d'évaluer le degré d'acceptabilité d'un concept, en vue de formuler des voies d'amélioration à destination des porteurs de projet. Elle aborde les deux registres de l'usage : les pratiques et les représentations. Elle est fondée sur le discours des individus interrogés, par rapport à un sujet qui leur est présenté. Au moment où est appliquée cette méthode, l'acceptabilité va constituer une « preuve de validité » de la conception elle-même et elle va orienter le cadre dans lequel va se développer le concept. La méthode CAUTIC augmente les chances d'une large diffusion d'une innovation, en déterminant les significations d'usage⁴¹ attribuées par les utilisateurs à l'innovation qui leur est proposé à l'aide de vingt critères (détaillés dans Annexe 20) explorés lors d'une enquête de terrain :

⁴¹ « Représentations et valeurs qui s'investissent dans l'usage d'une technique ou d'un objet » [367]

- au niveau des **savoir-faire**, assimiler la technique nouvelle à ses savoir-faire techniques coutumiers (*Banalisation – comment ça marche ?*),
- au niveau des **pratiques**, associer l'innovation à ses pratiques courantes (*Hybridation – Qu'est-ce que ça fait ?*),
- au niveau de l'**identité**, approprier l'innovation à son identité privée et professionnelle (*Identité active – A qui ça s'adresse ?*),
- au niveau de l'**environnement**, adapter l'innovation à ses relations sociales dans son environnement privé ou professionnel (*Evolution – Comment ça s'intègre ?*).

Le travail de l'expert CAUTIC se concentre aussi fortement sur la gestion des paradoxes dans les discours et les comportements ; l'enjeu n'étant pas de les faire disparaître mais de leur permettre de cohabiter d'une manière ambivalente.

Dans le cas du concept COFFEE, la démarche CAUTIC a suivi cinq phases présentées Figure V.4.

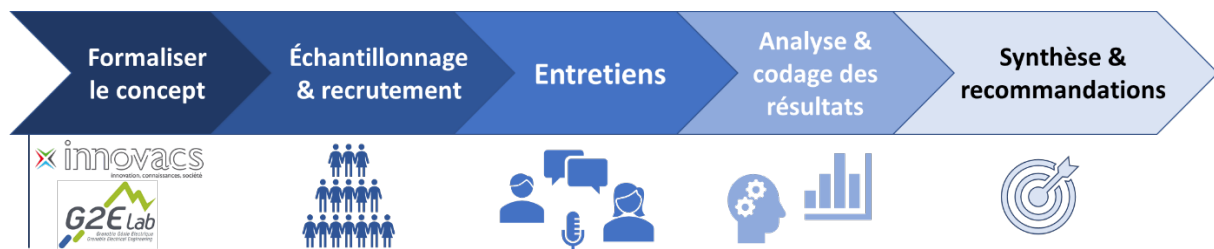


Figure V.4 : phases de la méthode CAUTIC appliquée au concept de plateforme COFFEE.
Source : auteur.

La phase de formalisation s'est appuyée sur le concept de COFFEE tel que présenté dans la section V.3.1, et a permis de faire ressortir les trois profils visés pour l'échantillonnage dans l'enquête : chercheurs, collectifs citoyens et collectivités publiques & bureaux d'étude. En outre, la première version du concept de COFFEE a été enrichie de scénarios d'usages construits autour de trois « persona », profils d'utilisateurs types de la plateforme qui sont présentés en détail dans la section V.3.3.1.

Au total l'enquête a porté sur un échantillon de **15 personnes interrogées** correspondant à l'échantillon cible (en plus de deux entretiens tests) :

- 6 Ingénieurs et/ou Collectivité : 3 Publics (collectivités, ALEC) et 3 Privés,
- 5 Collectifs Citoyens,
- 4 Chercheurs.

Les interviewés proviennent de différents lieux en France et n'ont aucun lien avec OMEGAAlpes, COFFEE ou le projet Eco-SESA. Cet échantillon n'est pas aussi représentatif que dans des études quantitatives, mais les 20 heures d'entretiens avec les profils d'utilisateurs permettent d'identifier et de caractériser des facteurs clés pour l'adoption de COFFEE. A chaque entretien, un scénario était présenté en cohérence avec le profil de l'utilisateur interrogé en plus d'un scénario collectif. Enfin, les résultats d'enquête ont été délivrés et consistent d'une part en une évaluation de l'acceptabilité et de l'expérience utilisateur de COFFEE, et d'autre part en des recommandations pour le déploiement de la plateforme.

V.3.2.2. Résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE

V.3.2.2.a. Résultats généraux de l'enquête CAUTIC

Concernant l'évaluation de l'acceptabilité de COFFEE, une synthèse des résultats bruts est présentée dans le Tableau 14.

Niveaux et critères	Tendance	Validation	Invalidation	Condition	NSP
1. Savoir-faire		22	0	11	0
1.1. Compréhensible		2	0	1	0
1.2. Simple d'utilisation		8	0	0	0
1.3. Raccroché à l'existant		4	0	3	0
1.4. Choix fonctions facile		6	0	4	0
1.5. Envisageable		2	0	3	0
2. Pratiques		32	1	41	1
2.1. Intérêt		4	0	1	0
2.2. Complète l'existant		5	0	6	0
2.3. Comparaison		10	1	14	0
2.4. Résolution		6	0	9	1
2.5. Nouvelle organisation		7	0	11	0
3. Identité		30	1	22	0
3.1. Cible comprise		12	0	6	0
3.2. Agir sur son rôle		9	0	6	0
3.3. Compatible		5	1	7	0
3.4. Imaginer usage		2	0	1	0
3.5. Imaginer extension		2	0	2	0
4. Environnement		26	0	40	0
4.1. Évolution en phase		7	0	6	0
4.2. Adapté aux relations		2	0	1	0
4.3. Adapté à la place		9	0	16	0
4.4. Adapté à l'organisation		8	0	17	0

Tableau 13 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur.

Les résultats de l'enquête indiquent une **validation** générale des concepts de COFFEE, notamment en termes d'assimilation aux savoir-faire existants (la compréhension du concept) et appropriation à l'identité sociale (la compréhension du ciblage). Certains critères des niveaux 2 et 4 sont toutefois soumis à **conditions**, telles que l'ergonomie, l'animation ou l'orientation stratégique.

V.3.2.2.b. Résultats de l'enquête CAUTIC par profils utilisateurs

Les résultats triés par profils ainsi qu'un extrait des résultats d'expérience utilisateur sont également présenté dans l'Annexe 21. Ils fournissent des indications complémentaires aux résultats généraux.

- Les publics **chercheurs** portent un regard positif à l'assimilation de COFFEE aux savoir-faire existants de l'utilisateurs (niveau 1) en identifiant bien l'intérêt de chaque profil visé, tout comme son appropriation à l'identité sociale de l'utilisateur (niveau 3) en adhérant, par exemple, au principe de science ouverte. Cette catégorie va même à

l'encontre de la tendance globale concernant l'intégration aux pratiques courantes de l'utilisateur (niveau 2), en soulignant la pertinence du profil citoyen dans la démarche collaborative. Le niveau concernant l'adaptation à l'environnement de l'utilisateur (niveau 4) est, quant à lui, remis en question par les chercheurs, notamment sur le fait que le partage de cas d'étude peut être complexe à réaliser.

- La catégorie des **Ingénieurs et/ou Collectivités** est totalement en accord avec la tendance globale de l'enquête. En effet, ce profil comprend comment COFFEE peut s'assimiler aux savoir-faire existants de ses utilisateurs (niveau 1), en devenant notamment un moteur de recherches de ressources sur la transition énergétique. Pour eux, le concept est aussi approprié à l'identité sociale des usagers (niveau 3) en venant, par exemple, répondre à un besoin de transparence. A l'image de l'enquête globale, cette catégorie conditionne l'intégration de COFFEE aux pratiques de l'utilisateur (niveau 2), par peur d'une charge de travail supplémentaire pour les contributeurs de COFFEE. L'adaptation de COFFEE à l'environnement social ou professionnel de l'utilisateur (niveau 4) est elle aussi nuancée et se doit de renforcer les fonctionnalités de réseautage pour être complètement validée.
- Enfin les **collectifs citoyens** sont plutôt réservés sur le projet COFFEE et conditionnent quasi-systématiquement son usage (11/14 critères). C'est aussi l'unique catégorie à avoir émis des remarques négatives sur le projet. Même s'ils valident l'assimilation aux savoir-faire existants de l'utilisateur (niveau 1) à travers la fonctionnalité intéressante de la bibliothèque de cas d'études, le niveau sur l'appropriation à l'identité sociale (niveau 3) pose problème, notamment, par rapport à une projection ambitieuse sur la segmentation ou encore par un sous-dimensionnement des moyens d'animation. En ce qui concerne les autres niveaux l'avis des collectifs citoyens suit la tendance comme on peut le voir quand ils conditionnent l'intégration aux pratiques existantes de l'utilisateur (niveau 2) sur le fait que les ressources sur les domaines socio-économiques devraient être autant partagées que les ressources uniquement techniques. Pour finir, ils émettent aussi des doutes sur l'adaptation de COFFEE à l'environnement (niveau 4) en conditionnant la démarche collaborative : selon eux il faudrait instaurer une véritable collaboration entre acteurs opérationnels et chercheurs dans une logique de recherche-action.

V.3.2.2.c. *Recommandations pour le développement de COFFEE*

Cette enquête a donné lieu à un jeu de 12 recommandations pour répondre aux freins à l'usage identifiés.

1. *Clarifier le rôle ensemble de COFFEE* : adopter une approche partenariale avec les acteurs qui fournissent des ressources, en en proposant de nouvelles uniquement pour créer de la valeur ajoutée par rapport à l'existant (e.g. par l'ouverture des contenus). Offrir des conseils et guides dans l'écosystème complexe de la modélisation énergétique, pour que l'accès aux ressources soit intuitif et inclusif.
2. *Positionner COFFEE dans une dynamique de science ouverte pour les acteurs de la transition énergétique* : positionner la plateforme comme mettant à disposition des connaissances scientifiques existantes, et souligner la réciprocité de la recherche menée sur les

terrains, partageant ainsi des bénéfices concrets pour les territoires. Une piste intéressante pourrait être d'identifier collectivement de futurs enjeux et verrous à court et long terme dans le domaine.

3. *Renforcer la lisibilité de COFFEE en termes de modèle économique* : rassurer sur la pérennité de la plateforme et sur le modèle libre et ouvert de mise à disposition des connaissances, afin que les utilisateurs aient suffisamment confiance pour contribuer.
4. *Libérer le gisement de ressources individuelles* : prospecter pour révéler le gisement de ressources formelles et informelles, pouvant mener à des collaborations. Encourager le partage par la sensibilisation autour des pratiques de science ouverte, la valorisation de l'intérêt mutuel du partage, et rassurer quant à la charge de travail demandée.
5. *Organiser les données* : offrir un cadre standard de formalisation des données pour faciliter la contribution et rendre repérables et exploitables les ressources répertoriées. Cela s'organise selon différents critères pouvant aller de l'évaluation par les pairs, un indicateur de maturité (e.g. TRL pour *Technology Readiness Level*), niveaux de difficulté, etc...
6. *Proposer une vérification et certification des données fournies* : se positionner comme un réseau de confiance de par sa neutralité, afin d'orienter et fiabiliser les études.
7. *Animer le réseau COFFEE* : valoriser les nouveaux contenus et événements, et faciliter la tenue d'ateliers thématiques favorisant l'entretien de réseaux. Décloisonner les communautés sur des enjeux opérationnels, concrétisant ainsi le transfert de la recherche.
8. *Clarifier le positionnement entre solutions matures et innovantes* : positionner les ressources selon leur niveau de maturité. Cela peut être essentiel pour l'implication d'acteurs tels que les bureaux d'étude, en accord avec leur modèle stratégique ouvert ou privé.
9. *Accompagner la montée en compétences de novices dans les collectifs*, avec des ressources élémentaires. Également inciter à la montée en compétence collaborative des publics plus experts.
10. *Accompagner la relation entre métropoles et petites collectivités* : alors que les métropoles urbanisées bénéficient généralement d'un réseau d'experts déjà relié au monde de la recherche, les plus petites collectivités pourraient bénéficier de la plateforme pour accéder à des ressources et contacts avec ces métropoles et des chercheurs, par exemple pour accompagner de nouvelles dynamiques citoyennes.
11. *Équilibrer les ressources socio-économiques et purement techniques* : les ressources concernant des enjeux socio-économiques sont généralement difficiles à trouver pour les acteurs de l'énergie, et souvent plus pertinente pour eux que des éléments purement technologiques. Un lien interdisciplinaire avec les sciences sociales, économiques et juridiques, ainsi que des retours d'expériences sur des modèles organisationnels ou financiers devraient également être accueillis sur la plateforme.
12. *Mettre en place un moteur de recherche spécifique et une ressource humaine* : vu la grande variété de ressources et de niveaux d'expertises, un moteur de recherche dédié et une ressource humaine pourraient aider dans la médiation et l'indexation.

La Figure V.5 présente le volume d'occurrences d'une expression de besoin ou d'amélioration de COFFEE par les répondants. Puisque chaque entretien est réalisé en utilisant le même

nombre de questions et le même protocole, cela permet d'obtenir une évaluation fiable de l'importance des recommandations pour atteindre la satisfaction des profils d'utilisateurs ciblés. Le volume d'occurrence ne correspond toutefois pas forcément à un poids en termes de décisions à prendre, ni à un ordre de priorité pour orienter la conception de COFFEE. Pour cela il faut prendre en compte les priorités du concepteur, l'analyse des auteurs de l'étude CAUTIC et la priorisation des profils d'utilisateurs visés.

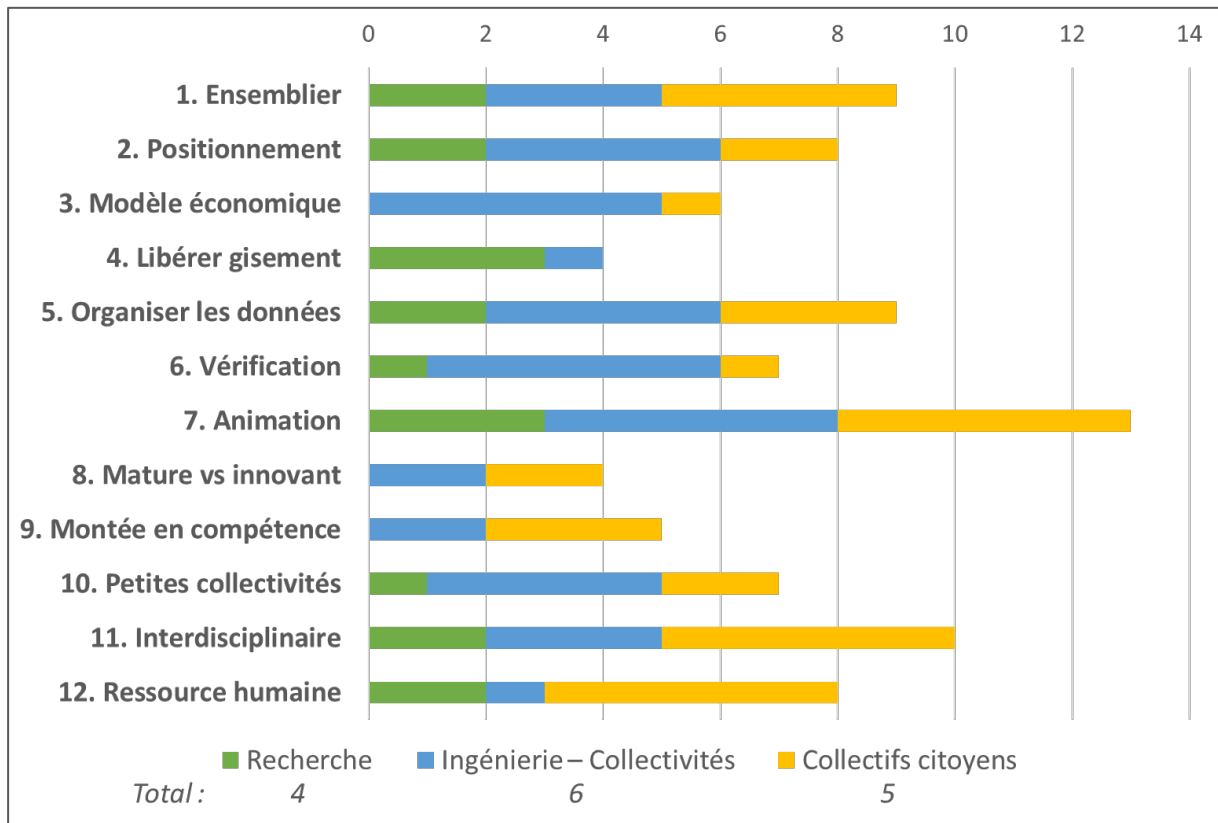


Figure V.5 : Occurrences des recommandations pour COFFEE par profils d'utilisateurs

On référera à ces recommandations comme *CAUTIC.numéro* par la suite (par exemple, *CAUTIC.7* pour la recommandation numéro 7 de CAUTIC : *Animer le réseau COFFEE*).

V.3.2.3. Croisement des résultats d'enquête

Le concept COFFEE et les 12 recommandations issues de l'enquête CAUTIC peuvent être croisés avec des projets et enquêtes semblables.

L'Étude de la coopération entre société civile, collectivités et entreprise (Codev3) [368] propose par exemple un panel de 8 recommandations. Certaines comme la mise à disposition et réutilisation d'outils et la construction d'un espace de partage collaboratif font directement écho au concept de COFFEE, là où d'autres répondent à des recommandations de l'enquête CAUTIC : la mise en place d'un environnement pour la montée en compétence et la présence d'une ressource humaine de médiation (respectivement recommandations *CAUTIC.9* et *CAUTIC.12*). D'autres recommandations ouvrent des perspectives à une implémentation du concept COFFEE : d'une part la communication et la diffusion, et d'autre part la qualification

d'éléments comme l'évolution des connaissances des utilisateurs sur le fond comme la forme, les retombées socio-économiques, et les liens avec les services de l'État.

Les 10 recommandations d'amélioration de modélisation énergétique basés sur les besoins utilisateurs du projet *SENTINEL* [369], si elles sont plutôt orientées sur des pratiques de modélisation, donnent un élément de comparaison supplémentaire (ces recommandations sont indiquées entre parenthèses ci-après). La majorité des recommandations sont alignées avec COFFEE : le besoin de plateforme accessible et permettant le développement d'un réseau (10), la transparence (7), l'implication des acteurs humains (8) tout comme la considération d'éléments sociotechniques (3) et l'approche systémique (1), ou encore l'importance équivalente du contenu et de la forme des ressources proposées (9). D'autres recommandations pointent des axes d'améliorations ou en tous cas de réflexion supplémentaires pour COFFEE : si l'explicitation des limites des approches de modélisation est essentielle dans la méthode ORUCE et donc dans COFFEE, la considération des incertitudes n'est qu'évoquée (8). Aussi, la prise en compte d'impacts environnementaux variés (2) et le support de politique publique (4) n'a que peu été exploré.

Enfin les travaux de déploiement de plateformes ouvertes et collaboratives de Linåker et Runeson [356] offre des conseils plus généraux, avec notamment le maintien d'indicateurs de santé et d'une liste d'acteurs pour l'écosystème, et la communication de l'importance du développement ouvert et collaboratif.

V.3.2.4. Discussion des résultats d'enquête

Ces résultats et recommandations seront utilisés pour la mise en œuvre d'une première version de l'instance COFFEE (voir la section V.3.5.2) afin d'être la plus pertinente possible pour les parties prenantes. L'ordre de présentation des recommandations dans la Figure V.5 correspond à l'ordre de priorité donné pour cette première implémentation au G2Elab. Pour une autre utilisation du concept COFFEE, d'autres priorités pourraient être données aux recommandations en fonction du contexte et du public cible : la Figure V.5 est une ressource mise à disposition qui peut être mobilisée pour déterminer la représentativité et la pertinence des recommandations par publics.

Des biais existent pour ces résultats de l'enquête menée, étant donné le faible nombre de participants. Le rôle d'une méthode centrée sur l'utilisateur telle que CAUTIC est de révéler au concepteur les attentes des profils d'utilisateurs, mais les besoins des utilisateurs ne constituent pas la stratégie de conception. Quel que soit le poids des recommandations, les résultats désignent simplement les axes d'améliorations en fonction du profil ciblé.

V.3.3. Scénarios d'usage pour l'utilisation de COFFEE

V.3.3.1. Scénarios d'usage par communauté d'acteurs

Cette section s'attache à détailler les scénarios d'usages qui ont été mobilisés dans le cadre de l'enquête CAUTIC. Ils ont eu pour but de stimuler une expérience utilisateur sur les quatre registres de significations d'usage, de faciliter la compréhension de COFFEE et d'identifier les besoins de chaque catégorie visée.

Dans le cadre d'activité de conception, l'utilisation de scénarios est pertinente pour donner une description narrative d'une activité et offrir une représentation commune entre usagers et concepteurs. L'utilisation de personas en complément, pour jouer le rôle de personnages dans les scénarios, peut en outre permettre d'informer les participants sur le contexte d'utilisation et s'assurer que celui-ci est pris en compte et partagé par tous. Des personas sont une description d'un utilisateur fictif pouvant créer de l'empathie et de l'identification et stocker des informations caractéristiques [238].

Quatre scénarios d'usage ont été développés, chaque persona disposant de son scénario propre, avec un scénario collectif en sus. Il est bon de noter que ces scénarios ont pour principale fonction de présenter des usages potentiels de COFFEE et non d'être réalistes. Ils ont bien sûr été confrontés à des utilisateurs potentiels lors de l'enquête CAUTIC. Ces quatre scénarios sont détaillés visuellement dans l'Annexe 22, et présentés dans l'encadré ci-après :

Alain est Maître de Conférence à Toulouse, il cherche à comparer son outil de dimensionnement de systèmes énergétiques à ceux développés au G2Elab.

- Avant de se plonger dans une lecture de la documentation, il décide d'explorer un cas d'étude pour appréhender le fonctionnement des outils plus facilement. Dans la bibliothèque, il en trouve un proche de ceux qu'il a l'habitude de traiter : valorisation de chaleur pour injection sur un réseau de quartier.
- A partir des données d'entrée fournies ouvertement, il peut lancer la résolution du cas d'étude sur son outil, et comparer les résultats et performances obtenues.
- Alain explore la documentation des outils pour bien saisir les capacités de ceux-ci. Il propose de collaborer autour de ce cas d'étude sur le forum.
- Suite à des retours enthousiastes, il développe un module permettant de calculer plus finement le bilan environnemental sur le cas d'étude. Une fois les tests réalisés, il soumet son module, qui peut ensuite être validé et intégré à l'outil.
- Au final, Alain aura participé à l'amélioration de l'outil, qui permet de comprendre plus finement les impacts environnementaux du projet de récupération de chaleur. Cette collaboration simplifiée par les données, outils et cas d'étude ouverts, pourra conduire à la rédaction d'un article commun, en open access bien évidemment !

Béatrice est ingénieure dans le service énergie d'une métropole et se voit confier la responsabilité d'un projet d'installation de panneaux photovoltaïques sur le toit d'un bâtiment public.

- Avant de se lancer tête baissée dans l'installation, Béatrice se questionne sur la production photovoltaïque et s'interroge sur la consommation énergétique du bâtiment public.
- Après des heures de recherches, Béatrice se retrouve perdue dans toutes les données présentes sur le web et pense peu à peu à renoncer à son désir de suivre la phase de conception de production photovoltaïque.
- Avant de se tourner vers un expert, Béatrice décide de parler de ses problèmes de recherches à une collègue de travail, qui lui recommande COFFEE.
- A son arrivée sur la plateforme, Béatrice accède à COFFEE la première rubrique : la bibliothèque de cas d'étude. Elle choisit alors le rapport sur la production photovoltaïque. Ce document complet lui permet de comprendre les outils pour la conception de production photovoltaïque.
- Suite à la lecture du cas d'étude, Béatrice se dirige vers la partie données et notamment celles concernant le niveau d'ensoleillement de la zone où est établi le projet.
- Ensuite, Béatrice peut se servir d'outils de modélisation énergétique pour comparer ses données de consommation énergétique avec un modèle photovoltaïque via un Jupyter Notebook.
- Enfin, pour achever sa connaissance primaire en termes de production photovoltaïque, Béatrice se documente dans la section articles scientifiques.
- Alors, la plateforme COFFEE a permis à Béatrice d'acquérir les bases du savoir pour suivre la conception de production photovoltaïque et ainsi limiter les asymétries de savoirs potentiels vis à vis d'un expert.
- Suite à cette expérience, Béatrice fait un retour en publiant son rapport d'étude dans le forum afin de faire réagir la communauté et enrichir la plateforme.

Cédric est développeur dans un tiers lieu sur les questions d'autonomie énergétique. Il cherche à utiliser ses données locales pour déterminer le productible éolien et solaire sur son lieu.

- Il commence à jeter un coup d'œil aux publications en open access pour se renseigner sur des travaux scientifiques.
- Suite à sa lecture, il se plonge dans un rapport d'étude disponible sur la plateforme, pour mieux savoir comment utiliser ses données.
- Le rapport d'étude le renvoie naturellement vers les outils de modélisation qui permettront à Cédric d'obtenir lui-même des résultats en utilisant ses propres données locales.
- Cependant, Cédric rencontre quelques difficultés au niveau de la compréhension de l'outil. Il se rend alors dans l'espace FAQ sur le forum pour mieux cerner son utilisation et achever son étude.

- Grâce aux outils de modélisation, Cédric cherche à discuter avec la communauté de ses résultats pour trouver une solution répondant à ses besoins.
- Suite à des échanges avec la communauté, Cédric perçoit qu'une solution de solaire thermique pourrait être la plus pertinente et décide de poursuivre ses recherches en ce sens.

Scénario collectif : On retrouve nos 3 protagonistes dans un projet collaboratif initié sur le forum de COFFEE. Ils s'interrogent sur l'impact environnemental d'un système de panneaux photovoltaïques combinés à une batterie.

- Avant de commencer, Béatrice propose au reste du groupe de s'appuyer sur son récent projet d'installation de panneaux photovoltaïques puisque ces travaux avaient fait l'objet d'un rapport d'étude disponible dans la bibliothèque de la plateforme.
- A partir des données disponibles dans le cas d'étude de Béatrice, Alain propose d'utiliser son module, lui aussi disponible sur la plateforme, pour mesurer les performances énergétiques et mesurer l'impact environnemental.
- Suite à des résultats peu encourageants, Cédric propose un scénario de conception alternatif mettant en avant la sobriété énergétique.
- Après l'intervention de Cédric, les 3 personnages se replongent dans leur étude qui se conclura par des résultats beaucoup plus satisfaisants. Les conséquences de ces échanges ne se résument pas aux performances. Regardons de plus près ce que chacun a su tirer de cette aventure : Alain va intégrer ce type de stratégies à ces travaux de recherches à venir, Béatrice réfléchit à de nouvelles manières de mener à bien les projets énergétiques à l'avenir en prenant en compte plus finement les impacts environnementaux, et Cédric a pu mieux comprendre les flux énergétiques

V.3.3.2. Scénarios d'usage systémique

De manière plus générale, et en complément du diagramme ORUCE présenté Figure III.1 qui correspond à une étude unique, un « diagramme d'usage systémique » de COFFEE peut être esquissé, i.e. un diagramme présentant les usages de la plateforme à l'interface des différentes communautés de parties prenantes. Celui-ci est inspiré du diagramme « Futures and systems views » de Robbie Morrison [370], qui tente de réconcilier au sein d'une communauté d'analyse systémique ouverte, les visions de l'avenir de la société civile et l'approche systémique de la communauté de modélisation énergétique ouverte. Le diagramme d'usage systémique de COFFEE est présenté Figure V.6. On y retrouve au centre la plateforme COFFEE avec en son cœur, le catalogue de cas d'étude, qui renvoie lui-même vers les catalogues de données ouvertes, d'outils open source et de résultats et publications ouverts. Les autres composants de la plateforme sont également présents : les étiquettes de terrain ou thématique, le guichet des problématiques, et les ressources qui peuvent être statiques (articles) ou collaboratives et dynamiques (écosystème, bonnes pratiques). Le forum et les événements de médiations constituent quant à eux l'interface avec les utilisateurs.

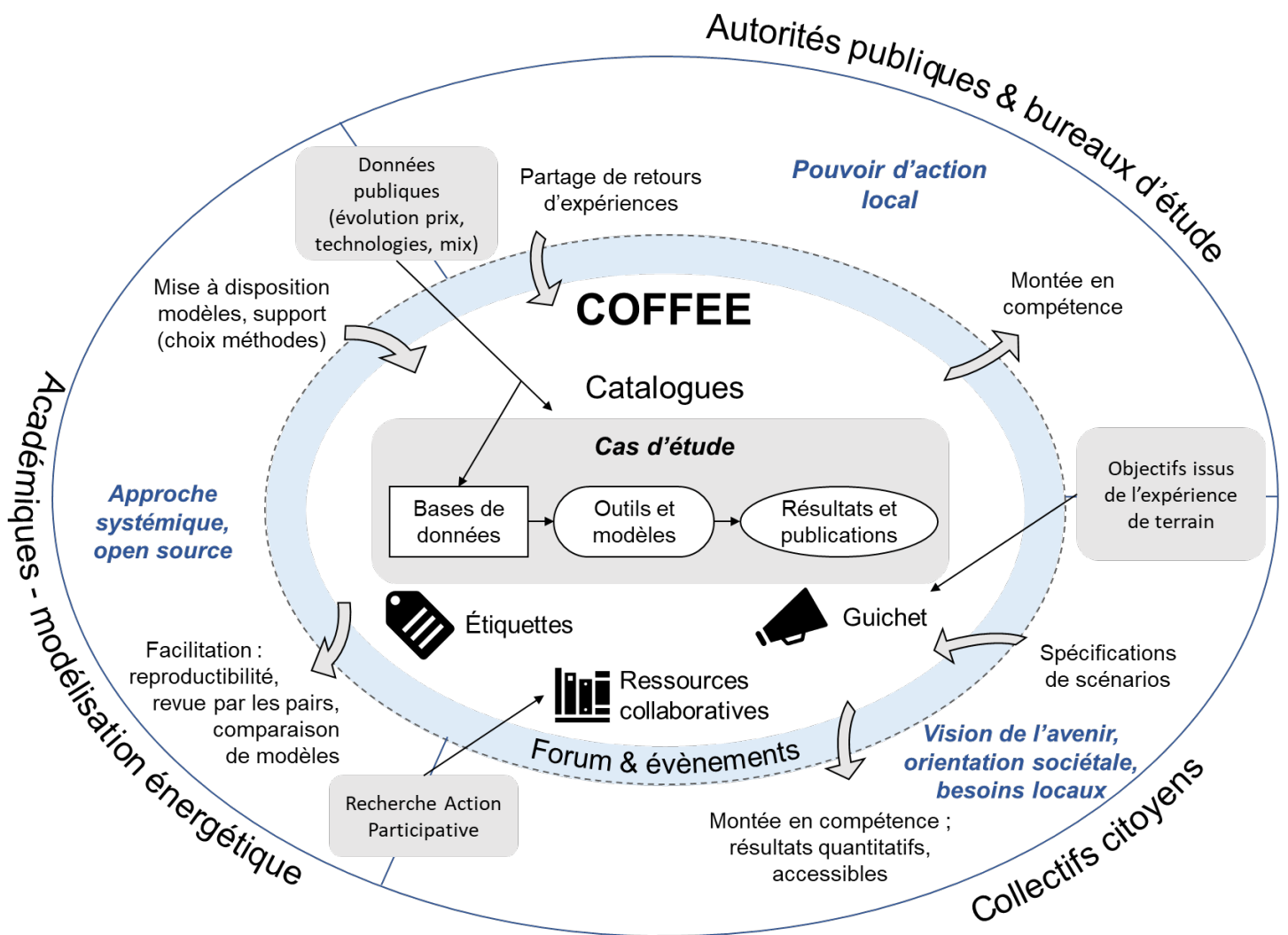


Figure V.6 : diagramme d'usage systémique de COFFEE. Source : auteur

Les utilisateurs sont répartis en 3 groupes cibles : le public académique travaillant sur la modélisation énergétique, les collectifs citoyens, et les autorités publiques et BE. Chaque groupe comprend des caractéristiques en gras, des relations à la plateforme notifiées par des flèches pleines, ainsi que des interfaces avec les autres communautés.

On notera que si les bases de données sont principalement alimentées par les répertoires de données ouverts d'organismes publics (laboratoires ou autorités publiques), des actions de science participatives peuvent également permettre une mise à disposition de données citoyennes. Les informations spéculatives quant à elles, rendant compte de l'évolution de différentes valeurs comme le prix de l'énergie, les mix énergétiques, le déploiement de technologies émergentes alimentent les scénarios et constituent des hypothèses et données transparentes pour les cas d'étude. De manière générale, les relations à la plateforme permettent une montée en compétence aussi bien pour experts que pour novices, et une amélioration continue des recherches et scénarios. Enfin, ce diagramme reprend l'idée centrale de celui de Robbie Morrison selon laquelle les modélisateurs doivent laisser à la société civile le soin de choisir les objectifs et hypothèses qualitatives des scénarios énergétiques.

V.3.4. La plateforme COFFEE dans un cadre constructiviste

La plateforme COFFEE s'inscrit dans l'approche constructiviste présentée dans la section I.3.2, où les connaissances dépendent du contexte général, ainsi que des objectifs et du contexte du modélisateur. Ainsi les différents formulaires (section V.3.1.2) présentent une vision systémique des ressources, introduisant aussi bien les considérations techniques du système énergétique étudié que les acteurs impliqués avec leur contact, objectifs et contexte. COFFEE peut alors être vue comme une Organisation au sens de Wurtz [137], mettant en relation les porteurs de connaissances et compétences pour combiner et rendre opérationnelles ces dernières. Cette vision est détaillée ci-après.

L'intelligibilité et la capacité à être délibérable sont deux clefs des connaissances présentées dans COFFEE, avec respectivement les portes d'entrée intuitives que sont les cas d'étude et les terrains, ainsi que les efforts d'accessibilité déployés autour des ressources avec l'approche ORUCE, et d'autre part les espaces de socialisation disponibles pour échanger sur les ressources proposées. En précisant le contexte dans les formulaires comme dans les cas d'étude présentés selon la méthode ORUCE, la notion d'effectivité est préférée à celle d'efficacité : les résultats présentés sont valables pour des hypothèses et un contexte explicitement renseignés. La plateforme ne facilite ainsi pas la découverte d'une « meilleure solution », mais plutôt d'une solution *satisfaisante* pour l'utilisateur fonction de sa perception du problème et de ses capacités et limites. En mettant à disposition un ensemble de cas d'étude effectifs, intelligibles et pouvant être délibérés, la plateforme offre un espace de confiance et assume la rationalité limitée des utilisateurs.

Enfin, l'importance des espaces de socialisation synchrones tels que des ateliers thématiques en lien avec différentes communautés d'acteurs a déjà été soulignée (CAUTIC.7). La plateforme avec ses espaces de socialisation asynchrones (forum) permet d'extérioriser les connaissances issues des échanges via les compte-rendu d'ateliers thématiques ou les ressources collaboratives, agissant comme un catalyseur de médiation et socialisation. Ses ressources de connaissances explicites peuvent également être combinées et intériorisées, le tout suivant la logique des modes de conversion de la connaissance et l'axe de progrès de Grundstein [146].

V.3.5. Du concept à l'implémentation de COFFEE

V.3.5.1. Différencier le concept de la solution déployée pour la plateforme COFFEE

Jusqu'ici, le Chapitre V a présenté le concept COFFEE de plateforme collaborative pour la modélisation énergétique ouverte, alimenté par la littérature, les travaux de thèse et l'étude CAUTIC. Ce concept a pour vocation d'enrichir les connaissances dans ce domaine émergent, et peut être implémenté de diverses façons en fonction des moyens et objectifs des acteurs qui s'en emparent. Au G2Elab, une première implémentation est en cours de déploiement, et servira aussi bien à éprouver le concept qu'à servir les acteurs locaux et distants souhaitant avoir accès aux travaux du laboratoire et échanger avec le G2Elab. Dans un premier temps, cette première version ne répondra pas à toutes les ambitions du concept de COFFEE qui ont été présentées mais sera utilisable pour de premières fonctionnalités jugées prioritaires, jouant le rôle de vitrine pour le laboratoire. La plateforme évoluera ensuite de manière récursive au

fil des versions, pouvant se rapprocher du concept COFFEE en enrichissant ses fonctionnalités, mais pouvant aussi s'en éloigner selon l'usage et les premiers retours d'expérience. Cette évolution est présentée Figure V.7, où l'ellipse pleine représente le concept COFFEE, l'ellipse v0 en trait plein une première implémentation, et les ellipses en traits pointillés des implémentations à venir.

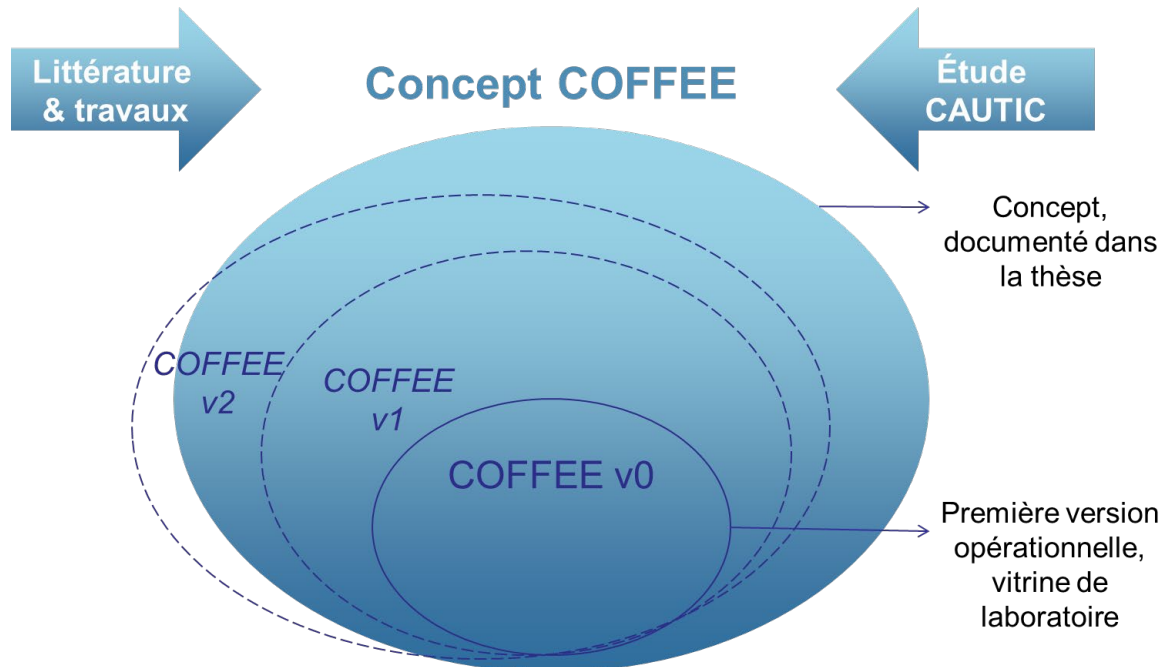


Figure V.7 : schéma de principe de distinction entre le concept et l'implémentation dans ses différentes versions de COFFEE

Là où le concept COFFEE a été éprouvé avec l'enquête CAUTIC, l'instance du concept sera éprouvée via son implémentation. Il est bon de noter que cette implémentation ne sera qu'un prototype dans le cadre de la thèse, ce cadre ne permettant justement pas d'observer la phase de production. Le concept développé et les premières expériences d'enquête et d'implémentation sont au service de la pérennité de la plateforme, mais cette pérennité ne pourra être validée sur le temps des travaux de thèse. Des recommandations et perspectives sont toutefois offertes.

V.3.5.2. Premières implémentations de la plateforme COFFEE au G2Elab

La distinction étant faite entre concept et implémentation de COFFEE, cette section abordera la partie implémentation au G2Elab. Étant donnés les moyens et les objectifs d'une instance de COFFEE au G2Elab, le choix de développement a été de cibler plus particulièrement le profil des chercheurs parmi les trois profils d'utilisateurs identifiés initialement. Ce choix s'explique par le fait que l'implication des chercheurs comme fournisseurs de contenus dans une logique sciences ouvertes est essentielle à la proposition de valeur COFFEE vers les autres profils et vitale pour l'alimentation de la plateforme en ressources actualisées. Les collectifs citoyens constituent la seconde cible dans l'objectif de créer un impact plus immédiat et plus facile d'accès en matière de transfert des résultats de la recherche académique vers les acteurs opérationnels de la transition énergétique. Enfin le profil des ingénieurs des collectivités ou des BE privés ouverts au logiques sciences ouvertes n'est pas exclu, mais il se fera par

incidence sur les projets mobilisant les collectifs. Ainsi les recommandations ont été structurées par ordre de priorité en trois niveaux :

- Recommandations prioritaires (*CAUTIC.1* à *CAUTIC.6*)
- Recommandations conditionnées ou secondaires (*CAUTIC.7* à *CAUTIC.9*), avec notamment des conditions de ressources humaines et de taille de communauté, non-assurée en phase de déploiement.
- Recommandations jugées non prioritaires ou hors d'atteinte (*CAUTIC.10* à *CAUTIC.12*), où l'intégration de ressources interdisciplinaire et interactions avec les métropoles dépasse le cadre d'une implémentation de COFFEE pour le G2Elab seul. Ces recommandations ne sont toutefois pas écartées mais s'intégreront dans des projets interdisciplinaires plus vastes, qui constituent des perspectives potentielles à l'implémentation de la plateforme.

Plusieurs leçons ont été tirées de expériences menées au laboratoire (section V.2.3) et de l'enquête CAUTIC pour un déploiement pérenne des différentes parties et fonctionnalités d'une instance de plateforme collaborative et ouverte au G2Elab (Figure V.8) :

- *Données* : les données des cas d'études sont pour partie directement stockées sur les dépôts git pour les jeux de données légers liés à des cas d'étude, ou bien sur des bases de données dédiées stockées sur un serveur local, avec des affichages dynamiques en ligne au moyen d'API ou de services tels que Grafana⁴². La publication des données dans des *data papers* est une bonne pratique à développer [285].
- *Outils et cas d'étude* : les modèles et cas d'études de l'instance de COFFEE sont disponibles et déployés sur la plateforme Gitlab du service Gricad de l'Université Grenoble Alpes, avec les groupes OMEGAAlpes [371] ou *design_optimization* [372] pour l'outil NoLOAD. Cela permet d'appuyer la capitalisation de ces éléments sur une plateforme Open Source supportée par service publique a priori pérenne. Le langage Python utilisé est également ouvert et de plus en plus considéré comme une référence. En outre, Gitlab utilise la technologie *git* qui permet une distribution des répertoires ainsi que de l'historique de code, ce qui assure une certaine résilience de ces éléments. Concernant les Jupyter Notebooks et leur usage via le service en ligne Mybinder, la question de la pérennité reste ouverte étant donnée l'évolution rapide des solutions de notebooks et le coût numérique lié à leur utilisation qui reste à quantifier.
- *Articles* : les articles sont déposés sur la plateforme publique HAL⁴³, a priori pérenne, et gérer via l'outil bibliographique open-source Zotero⁴⁴.
- *Forum* : le forum est déployé en interne via la solution Open Source Discourse⁴⁵, ce qui permet d'assurer un accès aux contenus sur le long terme et d'en garder le contrôle. Une première instance de forum a été déployée dans le cadre des travaux de thèse avec la communauté Low-Tech Recherche et Enseignement (LowTRE) (section I.3.3.3),

⁴² Lien vers l'interface Grafana de la base de données du G2Elab : <https://mhi-srv.g2elab.grenoble-inp.fr/grafana/>

⁴³ Dépôt ouvert HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/>

⁴⁴ Site de Zotero : <https://www.zotero.org/>

⁴⁵ Site de la solution de forum Discourse : <https://www.discourse.org/>

permettant de faire l'expérience du déploiement d'un forum Discourse, mais aussi et surtout de l'animation et la coordination d'une communauté.

- *Vitrine* : la vitrine ou gare centrale de la plateforme que représente le site internet de COFFEE est en cours de développement en interne à l'aide du Système de Gestion de Contenu (ou CMS pour *Content Management System*) Open Source Wordpress, la référence du domaine. Elle n'intègre pour l'instant pas les fiches terrains. C'est sans doute l'élément le plus fragile car plus récent et moins éprouvé, mais aussi et comme le forum, centralisé.



Figure V.8 : Illustration des premières briques de l'implémentation COFFEE. Source : auteur, T. Carrano.

Outre le déploiement des briques et de l'architecture logicielle, ont permis de premières évolutions et mises en pratique des principes de COFFEE :

- Les retours utilisateurs ayant donné lieu à la recommandation *CAUTIC.2* évoquaient des expériences d'utilisation des terrains d'étude pour nourrir les travaux académiques sans réelles contributions aux dynamiques territoriales. Cela conforte l'utilisation de

fiches terrains, pour assurer une forme de pérennité des recherches sur un terrain et ne pas le délaisser une fois le premier projet de recherche achevé.

- Les pratiques de recherche participative (section I.2.2.2) seront donc également à mobiliser pour assurer une réelle réciprocité entre monde académique et société civile. En outre, une section « Guichet » a été ajoutée pour que les collectifs citoyens et collectivités puissent faire remonter des problématiques énergétiques de terrain (voir Figure V.6).
- De premières expériences du volet médiation ont été réalisées, telles que recommandé par l'enquête, notamment avec *CAUTIC*.⁷ qui préconise la facilitation d'ateliers thématiques entre différents publics. Un cycle d'atelier ayant débuté en novembre 2020 autour de la capitalisation et diffusion des connaissances au sein de la communauté LowTRE⁴⁶ a été animé, et plus récemment, le cycle d'ateliers thématiques sur la question de l'autoconsommation évoqué dans la section IV.3.5.2. Ces expériences permettent d'initier des ateliers thématiques COFFEE en avance de phase et de mettre en pratique des formats et postures de médiation. Elles ne sont pas des validations mais tendent à réaffirmer l'importance d'espaces de socialisation synchrones.

⁴⁶ Pad de prise de note de l'atelier capitalisation et diffusion LowTRE : https://pad.lescommuns.org/24_11_LowTRE_diffusion_connaissance?view

V.4. Bilan et perspectives

Ce chapitre présente le concept de **plateforme collaborative COFFEE**, qui permet de faire le **lien entre différentes fonctionnalités de la modélisation énergétique ouverte**, avec une attention portée aux **communautés d'utilisateurs**.

Apports :

- Un **concept** de plateforme rassemblant les fonctionnalités de base de données, outils de modélisation, exécution en ligne et création de liens entre communautés, notamment aux échelles locales peu explorées jusqu'ici. Les cas d'étude sont au cœur de la plateforme, dans la continuité de la méthode ORUCE présentée au Chapitre 3.
- Une **enquête** centrée sur l'expérience utilisateurs CAUTIC a permis de qualifier sa pertinence pour ses différents publics, et de fournir un panel de recommandations pour le développement de plateforme de modélisation énergétique ouverte.
- Des **scénarios** d'usages sont proposés, et une première implémentation du concept est en cours.

Au-delà des fonctionnalités techniques et savoirs académiques mis à dispositions, COFFEE explore les formes, scénarios et modes d'animation pour que la plateforme soit la plus utile et utilisable possible pour des **communautés de chercheurs, d'autorités publiques et BE et de collectifs citoyens**.

Le concept COFFEE et les résultats de l'enquête associée sont destinés à être utilisés pour la **diffusion de plateformes** ouvertes de modélisation énergétique pour des objectifs et contextes différents. Ces plateformes pourraient alors devenir les nouveaux fers de lance des laboratoires.

Différentes perspectives sont envisagées pour ces travaux.

A court-terme, ces perspectives concernent **l'implémentation de COFFEE**. Une telle plateforme permettra d'expérimenter les retours réels des utilisateurs pour une validation d'usage, notamment en termes de dynamique de contribution [51]. Dans ce cadre, qualifier l'évolution des connaissances des utilisateurs et les retombées socio-économiques comme recommandé par d'autres projets semblables (section V.3.2.4) semble particulièrement pertinent. Des **cartographies des communautés** de pratiques pourraient être esquissées à l'image des travaux de Boujut et al. et leurs modèles de répartition d'activité, appliquée à la conception ouverte [373]. Le développement des **cas d'étude, des méthodes et des modèles collaboratifs**, mais aussi **d'ateliers thématiques** est à poursuivre avec les utilisateurs des différents publics, dans un cadre facilité et potentiellement interdisciplinaire.

Des **développements futurs** autour de la plateforme concernent notamment la facilitation du déploiement et de l'usage des environnements en ligne, avec le déploiement d'un service dédié. Des fonctionnalités facilitant la complétion des formulaires est également à considérer. En outre, le travail sur les formulaires pour les cas d'étude, les outils et les terrains sera mené en parallèle et pourra être rapproché des travaux de l'Open Energy Platform via des

contributions sur le répertoire de l'OEP par exemple. La communication et diffusion du concept est aussi une perspective, avec la question à explorer du choix entre centralisation des ressources dans une plateforme unique, ou subsidiarité avec une plateforme par laboratoire.

La **durabilité** de la plateforme doit être abordée selon plusieurs prismes :

- D'abord concernant la **pérennité de sa mise en œuvre** qui est particulièrement importante car reliée à la confiance que portent les utilisateurs en la solution. Une attention particulière des solutions de vitrines et de forum sera portée à ce sujet, notamment avec des capacités de portabilité. Des solutions d'archivages dédiées telles que Software Heritage [185] pourront notamment être mobilisées.
- Ensuite concernant sa **durabilité dans l'usage** : si l'analyse de l'enquête CAUTIC, les recommandations et leur croisement avec d'autres sources représentent de premiers éléments de validations pour la pertinence du concept COFFEE, d'autres validations doivent être abordés en phase d'usage. Des critères tels que des retours d'expérience plus quantitatifs, ou encore la capacité de la communauté à être autoportée à travers des indicateurs tels que le nombre et l'efficacité d'utilisateurs pourraient être proposés pour cette validation. Les efforts de développement d'ontologie de la modélisation énergétique tels que recommandés [180,182] et portés [184] par les acteurs du domaine sont autant d'actions à suivre et auxquelles contribuer pour assurer un usage pérenne, notamment dans le cadre de collaborations internationales.
- Enfin, un travail de **sobriété numérique** sur la plateforme de modélisation énergétique [374] doit impérativement être mené afin de s'assurer que les progrès réalisés dans les projets de transition énergétique ne soient pas contrebalancés par un usage de ressources numériques trop important, et aussi simplement pour avoir une cohérence dans les travaux de recherche-action comme de recherche plus académique.

Conclusion générale

« *Know what you don't know. The more you do research, the more you do. You just get used to not knowing, and know it's a quality in the end.* » Lieve Helsens,
Building Simulation 2021

Les travaux présentés dans cette thèse ont eu pour objectif de fournir des méthodes et outils pour rendre les processus de modélisation énergétique ouverts et collaboratifs.

CHAPITRE I

Pour ce faire, nous avons commencé par présenter les intérêts d'une modélisation énergétique ouverte dans le Chapitre I, notamment au regard des enjeux socio-écologiques actuels. Ce chapitre présentait également en quoi la modélisation énergétique ouverte s'inscrit dans un cadre épistémologique constructiviste, cadre apparaissant comme pertinent et nécessaire afin de bien prendre en compte la nature contextuelle des connaissances, et la place des acteurs humains dans les processus de modélisation. En outre, l'approche alternative des Low-Tech a été introduite, comme supports pertinents d'enseignement, et candidats pour retisser des liens entre milieu académique et société civile.

CHAPITRE II

Le Chapitre II présentait ensuite les pratiques de modélisation énergétique ouverte existantes, des données aux résultats en passant par les modèles énergétiques. Les ouvertures techniques et juridiques de ces éléments ont été détaillées, avant de se concentrer sur les outils de modélisation énergétique ouverte. Leur stratégie de développement a été abordée, avec des questions concernant les objectifs, phases d'étude, fonctionnalités et niveau de diffusion désirés, mais également un choix entre un développement propre ou des contributions à des outils existants. Les différentes fonctionnalités des outils de modélisation énergétique ont été détaillées, puis l'exemple de stratégie de développement de l'outil OMEGAAlpes a été fourni à titre illustratif. Enfin, les définitions et contours de la notion de reproductibilité, et des notebooks comme objets supports, ont été clarifiés.

CHAPITRE III

La méthode ORUCE a ensuite été introduite au Chapitre III, présentant des cas d'étude accessibles, utilisables et reproductibles comme objets de collaboration entre parties prenantes de projets énergétiques. La méthode, supportée par des notebooks et leur environnement associé, peut être mobilisée pour comprendre, adapter et comparer des travaux de recherche, mais également comme support de médiation. De premiers éléments de validation confirment la transparence et la reproductibilité de la méthode, même si des retours d'expérience d'usage et une appropriation plus large sont encore nécessaires.

Le Chapitre IV présentait un panel de cas d'étude sur deux thématiques : la chaleur fatale avec le projet de valorisation des calories en sortie d'aimants du LNCMI, et l'autoconsommation PV, avec des arbitrages entre degrés d'autonomie et émissions de

GES. Les processus de modélisation énergétique ouverts ont été mobilisés pour des applicatifs tels que des travaux de recherche, ou bien des supports de médiation ou d'enseignement, en lien avec différentes parties prenantes : acteurs de la recherche, opérateur de réseau d'énergie, collectivité locale, collectifs citoyens ou encore étudiants. La méthode ORUCE est ainsi illustrée sur une variété d'exemples, qui en soulignent les intérêts, mais aussi la nécessité de ne pas la considérer comme un formalisme figé et unique : la méthode est faite pour être adaptée et appropriée, en complément d'autres supports tels que des procédés ludiques et artistiques pour toucher à l'émotion et alimenter les imaginaires. En outre l'application de la méthode ORUCE et des pratiques d'ouverture a permis de leur reconnaître d'autres intérêts : une saine exigence concernant son processus de modélisation, une satisfaction à travailler de manière ouverte et un changement de paradigme de la compétition vers la collaboration sur les sujets communs.

Enfin, le concept de plateforme de modélisation énergétique ouverte et collaborative COFFEE est présenté dans le Chapitre V. Ce concept de plateforme fait le lien entre différentes fonctionnalités de modélisation énergétique ouverte (i.e. base de données, outils de modélisation, services en lignes et communauté), mais aussi entre les différentes communautés d'utilisateurs que sont la recherche, les pouvoirs publics, les bureaux d'étude et les collectifs citoyens. Une enquête centrée sur l'expérience utilisateur a permis de qualifier la pertinence de COFFEE auprès des publics destinataires, et de fournir un panel de recommandations appropriables pour le développement de plateformes de modélisation énergétique ouvertes.

Ces travaux permettent ainsi de tirer un bilan quant aux problématiques initiales présentées dans l'Introduction générale :

Pourquoi développer la modélisation énergétique ouverte ? Et pourquoi n'est-elle pas la norme ?

La modélisation énergétique ouverte apparaît comme essentielle pour faire face aux enjeux socio-écologiques auxquels l'énergie est intimement liée. D'abord en améliorant la qualité même de la science par sa transparence et sa reproductibilité, et en avançant ensemble sur ces sujets critiques par la mutualisation des efforts et ressources. Également en favorisant une position réflexive pour la recherche, nécessaire pour évaluer son impact et ses orientations. Enfin l'ouverture de la modélisation énergétique répond à un devoir de fiabilité et d'accessibilité des connaissances et travaux auprès des acteurs humains (rendre la recherche publique *publique*), renouant des liens entre Science et Société sur le sujet impactant qu'est l'énergie.

Plusieurs freins peuvent expliquer le retard des pratiques d'ouverture dans le milieu de l'énergie. D'abord le changement d'outils et de pratiques à partir de modèles fermés peut s'avérer difficile : du fait d'une stratégie d'enfermement propriétaire de certains outils, et d'écarts entre culture académique et culture du libre. Ces écarts demandent notamment un fort travail d'acculturation aux pratiques de Science Ouverte, et donc des efforts pour rendre ces pratiques compréhensibles et utilisables. Enfin, des changements plus profonds sont

nécessaires, au niveau des politiques et des institutions scientifiques, pour associer aux ambitions d'ouverture des incitations et des moyens plus importants.

Comment développer des méthodes et outils pour atteindre des objectifs de transparence, de collaboration et de reproductibilité dans le monde académique ? Et ce en impliquant différentes sphères de la société : la recherche, les autorités publiques et entreprises, et les collectifs citoyens.

Une première réponse fait écho à un frein : le besoin d'acculturation aux pratiques d'ouverture. Il s'agit alors de mettre en œuvre les pratiques de modélisation énergétique ouverte dans ses travaux de recherche. L'ouverture du processus de modélisation depuis les données jusqu'aux résultats, à travers des cas d'étude comprenant les codes et contextes d'étude apparaît notamment comme une méthode pertinente, tel que présentée dans la méthode ORUCE.

Au-delà des apports méthodologiques, ces pratiques doivent être mises en œuvre sur les terrains d'étude, puis partagées et discutées. Avec l'objectif de les rendre plus accessibles, et les adapter aux besoins de la recherche et des parties prenantes impliquées.

Des outils de mise en relation des parties prenantes sont alors nécessaires, tels que le concept de plateforme collaborative COFFEE. Ces outils sont des catalyseurs de la mise en relation, et s'inscrivent dans des modes d'organisation avec des formes et scénarios d'animation qu'il s'agit de réfléchir et développer.

Comment valider la pertinence de ces nouvelles pratiques ?

La validation de ces pratiques présuppose leur mise en application sur le terrain, et peut prendre différentes formes : de retours d'expérience ponctuels, jusqu'à des grilles d'analyse mobilisant des indicateurs qualitatifs et quantitatifs issus de la littérature. Des méthodes d'enquête, ou de recherche participative invitant les publics dans le processus de recherche dans une démarche transdisciplinaire, permettent de donner un pouvoir de validation aux parties prenantes concernées par les modèles énergétiques, améliorant de fait la pertinence de ces derniers.

La mise à disposition des connaissances permet de discuter et améliorer à la fois les travaux de modélisation énergétique menés, mais aussi les pratiques d'ouverture et de validation déployées. Elle réclame donc des essais, même partiels, en mettant de côté des craintes d'exposition : l'ouverture est un spectre sur lequel nous nous devons d'avancer.

➔ Ces éléments nous font entrevoir un futur pour la modélisation énergétique avec de nouvelles valeurs et pratiques :

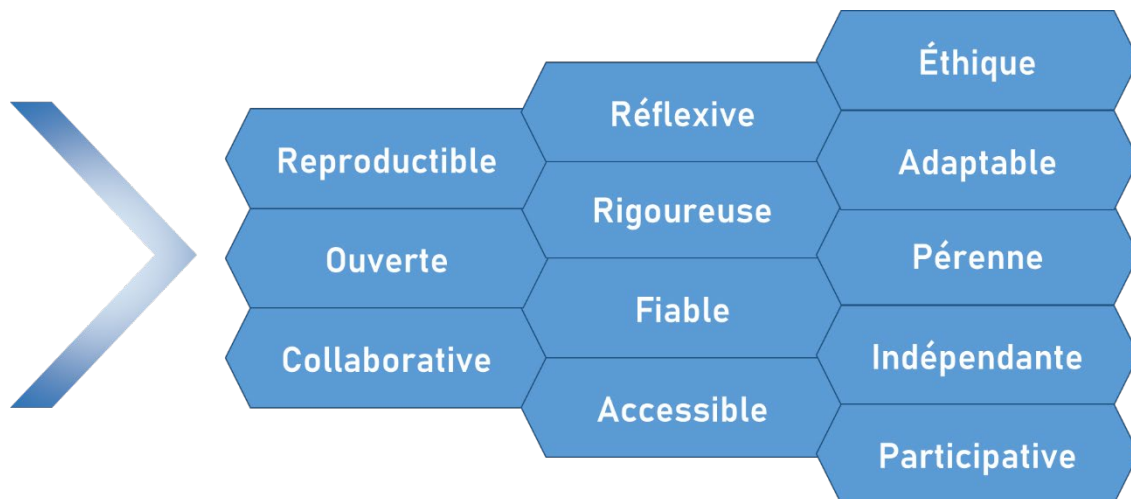


Figure 0.1 : Future de la modélisation énergétique ouverte. Source : auteur.

Perspectives

Au-delà de cas d'étude ouverts et reproductibles ? Épistémologie et participation

Une première perspective consiste bien sûr en l'usage de la méthode ORUCE sur des cas d'étude plus nombreux et variés, afin d'affiner la validation de la méthode et de la faire évoluer vers le mieux. Cela pourra passer par l'usage des mesures de l'effectivité des approches :

- quantitatives telles que le nombre de personnes qui consultent, exécutent ou adaptent des cas d'étude,
- qualitatifs via des indicateurs tels que la capacité à débattre, comprendre, s'approprier ou mutualiser des travaux.

Ensuite une réflexion de fond sur l'objet notebook et le rapport à l'utilisateur pourrait être menée. Au-delà de la reproductibilité technique du notebook (réexécution de toutes les cellules), questionner le parcours de l'utilisateur ou utilisatrice pour qu'il ou elle puisse le reproduire une analyse. Comment le notebook est-il donné à voir ? Questionner l'alignement entre les fonctions épistémiques du notebook avec celles recherchées par les utilisateurs. Ce genre de réflexions pourra être menée dans le récent groupe de travail autour des notebooks⁴⁷, et nourrir la méthode ORUCE et plus largement l'usage de notebooks dans la recherche et l'enseignement.

La poursuite des travaux autour de la méthode ORUCE passe aussi par le développement du volet médiation, peu théorisé dans ces travaux. Cela pourrait par exemple passer par la scénarisation des cas d'étude. Au-delà même de la méthode ORUCE, des pratiques de participation pourraient et devraient être développées dans le domaine de la modélisation énergétique, pour conduire à des futurs énergétiques viables et enviables [375]. La *modélisation énergétique participative* peut ainsi être vue comme une suite logique à la modélisation énergétique ouverte. Elle pourrait mobiliser tout un corpus de méthodes de la participation,

⁴⁷ Répertoire de ressource du GT notebook : <https://gitlab.huma-num.fr/gt-notebook>

comme par exemple la modélisation d'accompagnement de ComMod⁴⁸ pour faire face à des objets d'étude complexes et dynamiques [376], tout en prenant en compte de possibles fractures numériques dans la population.

Pérennité de COFFEE

Concernant COFFEE, la validation d'usage pourrait se poursuivre avec l'évaluation de l'évolution des connaissances qu'elle permet, et la mesure de ses impacts socio-économiques. Des améliorations sont également à considérer, par exemple sur la facilitation de la mise en œuvre d'environnements pour améliorer la reproductibilité des cas d'étude.

Plusieurs questions se posent également quant à sa pérennité. D'abord pérennité de la première implémentation de COFFEE au G2Elab : il faudra identifier et mobiliser de premières communautés d'utilisateurs pour lancer les contributions et collaborations au sein de la plateforme. Il pourra alors s'agir de personnels de recherche identifiés, mais aussi de groupes étudiants, en développant les pratiques d'ouverture dans les enseignements. Une attention plus importante pourrait être consacrée aux données, avec une réflexion sur la collecte et stockage de données, ou leur mise à disposition, via des publications dans des *data papers* par exemple. COFFEE pourrait alors s'articuler avec le projet fils de Eco-SESA : l'Observatoire de la Transition Énergétique [377], qui se concentrera sur ces questions.

La pérennité du concept de plateforme est aussi à questionner en cas d'usage généralisé, par exemple concernant l'interopérabilité de plateformes entre elles. Le web sémantique est une piste intéressante en ce sens, mais présuppose l'usage d'ontologies commune dont nous avons évoqué les difficultés de mise en place : il semble difficile d'adopter des cadres communs rigides sur les questions de conceptions et de scénarios énergétiques, cadres dont les connaissances tacites seront exclues par définition.

Enfin, c'est la soutenabilité de telles plateformes qu'il faut interroger, avec la mesure de la consommation d'énergie et de matières et en adoptant des pratiques de sobriété numérique. Des principes plus profonds d'*écologie* [378] questionnant la responsabilité éthique et écologique du numérique pourraient également être mobilisés en complément des principes FAIR, en s'inspirant des travaux menés au sein du projet EVEille⁴⁹.

Matérialité de la Science Ouverte : Communs et Low-Tech

Les pratiques de Science Ouverte & modélisation énergétique abordées dans cette thèse pourraient également s'incarner dans des lieux. Par exemple au LNCMI, qui on l'a vu, est une infrastructure de recherche ouverte et interdisciplinaire par essence, et pourrait au même titre que les outils et plateformes numériques open source, rejoindre ou initier un réseau de

⁴⁸ Association visant à concevoir, analyser, développer, et promouvoir les recherches scientifiques et leurs applications dans le domaine de la Modélisation d'Accompagnement. Il s'agit d'outils de représentation et de simulation du fonctionnement des socio-écosystèmes (e.g. modèles multi-agents, jeux de rôles) qui aident à franchir les frontières disciplinaires pour étudier les processus de coordination entre acteurs et de décision collective.

⁴⁹ Site du projet EVEille : <https://eveille.hypotheses.org/>

plateformes physiques de science ouverte. Les Boutiques des sciences sont également des lieux d'incarnation de la Science Ouverte et en particulier de la Recherche Participative. Il s'agit de lieux sur les sites universitaires ayant vocation à produire de la recherche en réponse à une demande sociale, pour et avec des collectifs citoyens [50]. Le développement d'une Boutique des sciences à l'Université Grenoble Alpes serait une occasion d'éprouver des méthodes de modélisation énergétique participative.

Enfin, dépassant les méthodes et outils développés dans cette thèse, les travaux pourraient se poursuivre sur les Low-Tech, comme incarnations d'objets énergétiques ouverts pour la recherche et l'enseignement. En profitant de la communauté LowTRE pour poser la question de la recherche *sur* les low-tech (e.g. sur des objets, systèmes et organisations low-tech, ou encore sur des pratiques telles que la documentation), mais aussi d'une forme de recherche Low-Tech dans ses pratiques (en termes d'accessibilité, de durabilité et d'utilité).

Publications

Ouvrage

- J. Fitó, **S. Hodencq**, L. Morriet, J. Ramousse, F. Wurtz, et G. Debizet, « Decision support for technical design of on-the-spot renewable energy projects involving several stakeholders », in *Local Energy Communities: Emergence, Places, Organizations, Decision Tools*, Routledge & CRC Press., Debizet, Papallardo & Wurtz, 2022 : <https://www.routledge.com/Local-Energy-Communities-Emergence-Places-Organizations-Decision-Tools/Debizet-Papallardo-Wurtz/p/book/9781032190662>

Revue

- Jonathan Coignard, **Sacha Hodencq**, Nana Kofi Twum-Duah, Rémy Rigo-Mariani, « Solar panels - Is more always better ? Assessing the carbon footprint of communities », vol. TATuP-special topic in issue 2/2022, p. 25-31, juill. 2022, doi: <https://doi.org/10.14512/tatup.31.1.15>
- **Sacha Hodencq**, Jonathan Coignard, Nana Kofi Twum-Duah, Lucas Hajiro Neves Mosquini. Including greenhouse gas emissions and behavioural responses for PV self-sufficient optimal design. COMPEL, 2022: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-10-2021-0392>
- **Sacha Hodencq**, Mathieu Brugeron, Jaume Fitó, Lou Morriet, Benoit Delinchant, et al. OMEGAlpes, an Open-Source Optimisation Model Generation Tool to Support Energy Stakeholders at District Scale. Energies, MDPI, 2021, 14, (10.3390/en14185928): <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03379547>
- Jaume Fito, **Sacha Hodencq**, Julien Ramousse, Frederic Wurtz, Benoit Stutz, Francois Debray, and Benjamin Vincent. Energy- and exergy-based optimal designs of a low-temperature industrial waste heat recovery system in district heating. Energy Conversion and Management, 211:112753, 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112753.
- Jaume Fito, Julien Ramousse, **Sacha Hodencq**, and Frederic Wurtz. Energy, exergy, economic and exergoeconomic (4E) multicriteria analysis of an industrial waste heat valorization system through district heating. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 42:100894, December 2020. doi: 10.1016/j.seta.2020.100894.

Conférence

- Nana Kofi TWUM-DUAH, **Sacha HODENCQ**, Manar AMAYRI, Stéphane PLOIX, Frédéric WURTZ, « Optimal sizing of stationary battery storage taking into account indirect flexibility in tertiary buildings: use case of an electric vehicle community », p. 518-522, CIRED, janv. 2022, doi: 10.1049/icp.2022.0761
- **Sacha Hodencq**, Fabrice Forest, Théo Carrano, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz, User experience inquiry to specify COFFEE: a Collaborative Open Framework For Energy Engineering, Electrimacs, may 2022 : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03655129v2>
- NoLOAD, Open Software for Optimal Design and Operation using Automatic Differentiation, Lucas Agobert, **Sacha Hodencq**, Benoit Delinchant, Laurent Gerbaud,

Wurtz Frederic. 16th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism. OIPE2020, Sep 2021, Online, France : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03352443>

- **Sacha Hodencq**, Jonathan Coignard, Nana Kofi Twum-Duah, Lucas Hajiro Neves Mosquini. Including greenhouse gas emissions and behavioural responses for PV self-sufficient optimal design. OIPE 2020, Sep 2021, Szczecin, Poland : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03341890>
- **Sacha Hodencq**, Jaume Fitó, François Debray, Benjamin Vincent, Julien Ramousse, et al... Flexible waste heat management and recovery for an electro-intensive industrial process through energy/exergy criteria. Proceedings of Ecos 2021 - The 34th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Jun 2021, Taormina, Italy : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03290126>
- **Sacha Hodencq**, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz. Open and Reproducible Use Cases for Energy (ORUCE) methodology in systems design and operation: a dwelling photovoltaic self-consumption example. Building Simulation 2021, Sep 2021, Bruges, Belgium : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03341883>
- **Sacha Hodencq**, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz. Vers l'ouverture des modèles d'optimisation de systèmes énergétiques pour l'Analyse de Cycle de Vie : cas d'étude d'un foyer en autoconsommation photovoltaïque avec l'outil open source NoLOAD. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2020), Nov 2020, Nantes, France : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03290015v1>
- **Sacha Hodencq**, Benoit Delinchant, Wurtz Frederic, Nils Artiges, Jérôme Ferrari, et al... Towards an energy open science approach at district level: application to Grenoble Presqu'île. 1st International Workshop on Open Design & Open Source Hardware Product Development, Mar 2020, Grenoble, France : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03052326>
- **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 : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03290009>
- Camille Pajot, Lou Morriet, **Sacha Hodencq**, Benoît Delinchant, Yves Maréchal, et al... An Optimization Modeler as an Efficient Tool for Design and Operation for City Energy Stakeholders and Decision Makers. 16th IBPSA International Conference (Building Simulation 2019), Sep 2019, Rome, Italy : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285954>
- **S. Hodencq**, F. Debray, C. Trophime, B. Vincent, B. Stutz, B. Delinchant, F. Wurtz, C. Pajot, L. Morriet, F. Bentivoglio, R. Couturier, N. Giraud et V. Aromatario, Thermohydraulique des champs magnétiques intenses : des microns jusqu'à l'échelle des communautés urbaines, Congrès Français de Mécanique, Brest, août 2019 : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02485061v1>

Autres

- Collectif, Comité Pour la Science Ouverte (CoSO), Livret Codes et logiciels, 2022 : <https://www.ouvrirlascience.fr/science-ouverte-codes-et-logiciels/>

- Guillaume Guimbretière, **Sacha Hodencq**, Martial Balland. Une approche de la low-tech dans l'Enseignement Supérieur et la Recherche, La Pensée Écologique, 2022 : <https://lapenseeecologique.com/une-approche-de-la-low-tech-dans-lenseignement-superieur-et-la-recherche/>

Bibliographie

1. Comité pour la Science Ouverte / collège Compétences & Formation, Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche, Université de Lille. Science ouverte : Code et logiciels (1ère édition). Guide thématique décliné du Passeport pour la science ouverte. [Internet]. 2022. Disponible sur: <https://www.ouvrirlascience.fr/science-ouverte-codes-et-logiciels/>
2. Eastes R-E. Peut-on se former à la médiation scientifique ? [Internet]. The Conversation. 2020 [cité 5 juill 2022]. Disponible sur: <http://theconversation.com/peut-on-se-former-a-la-mediation-scientifique-130727>
3. Trompette P, Vinck D. Retour sur la notion d'objet-frontière. *Revue d'anthropologie des connaissances*. 2009;3, 1:5-27.
4. Darses F. Résolution collective des problèmes de conception. *Le travail humain*. 2009;72:43-59.
5. Avec Alain Damasio : que peut dire la science-fiction quand on vit déjà dans un épisode de « Black Mirror » ? [Internet]. Radio France. 2018 [cité 18 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/tout-est-numerique/avec-alain-damasio-que-peut-dire-la-science-fiction-quand-on-vit-deja-dans-un-episode-de-black-mirror-5460950>
6. Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin FS, Lambin EF, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*. 2009;461:472-5.
7. Climate Watch. Greenhouse Gas (GHG) Emissions [Internet]. 2018 [cité 18 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>
8. P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Internet]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: IPCC; 2022. Disponible sur: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
9. Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*. 2015;347:1259855.
10. Wang-Erlandsson L, Tobian A, van der Ent RJ, Fetzer I, te Wierik S, Porkka M, et al. A planetary boundary for green water. *Nat Rev Earth Environ*. 2022;1-13.
11. Persson L, Carney Almroth BM, Collins CD, Cornell S, de Wit CA, Diamond ML, et al. Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environ Sci Technol*. 2022;56:1510-21.
12. Biermann F, Kim RE. The Boundaries of the Planetary Boundary Framework: A Critical Appraisal of Approaches to Define a “Safe Operating Space” for Humanity. *Annual Review of Environment and Resources*. 2020;45:497-521.
13. Ahmed N, Marriott A, Dabi N, Lowthers M, Lawson M, Mugehera L. Inequality Kills: The unparalleled action needed to combat unprecedented inequality in the wake of COVID-19 [Internet]. Oxfam; 2022 janv. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/10546/621341>

14. CGDD. L'environnement en France | Rapport de synthèse [Internet]. France; 2019 p. 220. Disponible sur: https://notre-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/9782111570573_lenvironnementenfrance_edition2019_rapportdesynthese_v24_web_light.pdf
15. Raworth K. A Safe and Just Space for Humanity: Can we live within the doughnut? Oxfam; 2012. Disponible sur: https://www-cdn.oxfam.org/s3fs-public/file_attachments/dp-a-safe-and-just-space-for-humanity-130212-en_5.pdf
16. Nations Unies. THE 17 GOALS | Sustainable Development [Internet]. 2015 [cité 27 mai 2022]. Disponible sur: <https://sdgs.un.org/fr/goals>
17. M. Algunaibet I, Pozo C, Galán-Martín Á, J. Huijbregts MA, Dowell NM, Guillén-Gosálbez G. Powering sustainable development within planetary boundaries. *Energy & Environmental Science*. 2019;12:1890-900.
18. Mallard K. Démarche de conception multicritère de système de production d'énergie : application à une hydrolienne durable et résiliente pour micro-réseau isolé [Internet] [phdthesis]. Université Grenoble Alpes [2020-....]; 2020 [cité 27 mai 2022]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03102861>
19. Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Internet]. 1^{re} éd. Cambridge University Press; 2022 [cité 27 mai 2022]. Disponible sur: <https://www.cambridge.org/core/product/identifiant/9781009157940/type/book>
20. Relva SG, Silva VO da, Gimenes ALV, Udaeta MEM, Ashworth P, Peyerl D. Enhancing developing countries' transition to a low-carbon electricity sector. *Energy*. 2021;220:119659.
21. Dubilly A-L, Fournier L, Chiche A, Faure N, Bardet R, Alais J-C, et al. A 100% renewable electricity mix? Analyses and optimisations Testing the boundaries of renewable energy-based electricity development in metropolitan France by 2050 [Internet] [report]. Ademe ; The International Nuclear Information System (INIS); 2016 [cité 15 juin 2022]. Disponible sur: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01409657>
22. Dobigny L. Quand l'énergie change de mains : socio-anthropologie de l'autonomie énergétique locale au moyen d'énergies renouvelables en Allemagne, Autriche et France [Internet] [These de doctorat]. Paris 1; 2016 [cité 15 sept 2021]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2016PA01H230>
23. Silvast A, Laes E, Abram S, Bombaerts G. What do energy modellers know? An ethnography of epistemic values and knowledge models. *Energy Research & Social Science*. 2020;66:101495.
24. IEA. Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems [Internet]. Paris; 2016 p. 418. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2016>
25. AIE. Sectoral Approaches in Electricity : Building Bridges to a Safe Climate [Internet]. OCDE. Paris; 2009 [cité 28 mai 2022]. Disponible sur: <https://www-oecd-ilibrary-org.sid2nomade-2.grenet.fr/docserver/9789264068735->

en.pdf?expires=1653734721&id=id&accname=ocid53014473&checksum=22E197447E380C3C48558A09C8ECE48

26. Lightner EM, Widergren SE. An Orderly Transition to a Transformed Electricity System. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010;1:3-10.
27. Samadi S, Gröne M-C, Schneidewind U, Luhmann H-J, Venjakob J, Best B. Sufficiency in energy scenario studies: Taking the potential benefits of lifestyle changes into account. *Technological Forecasting and Social Change*. 2017;124:126-34.
28. Zell-Ziegler C, Thema J, Best B, Wiese F, Lage J, Schmidt A, et al. Enough? The role of sufficiency in European energy and climate plans. *Energy Policy*. 2021;157:112483.
29. Bierwirth A, Thomas S. Energy sufficiency in buildings. Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy [Internet]. ecee concept papers. 2019; Disponible sur: <https://www.energysufficiency.org/libraryresources/library/items/energy-sufficiency-in-buildings-concept-paper/>
30. Illich I. *Énergie et Équité*. Editions du Seuil; 1973.
31. Jarrige F, Vrignon A, Collectif. *Face à la puissance: Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*. La Découverte; 2020.
32. Chang M, Thellufsen JZ, Zakeri B, Pickering B, Pfenninger S, Lund H, et al. Trends in tools and approaches for modelling the energy transition. *Applied Energy*. 2021;290:116731.
33. Optimus.community. The energy system [Internet]. 2017 [cité 30 mai 2022]. Disponible sur: http://www.osemosys.org/uploads/1/8/5/0/18504136/the_energy_system.pdf
34. Lund H, Arler F, Østergaard PA, Hvelplund F, Connolly D, Mathiesen BV, et al. Simulation versus Optimisation: Theoretical Positions in Energy System Modelling. *Energies*. 2017;10:840.
35. Raad A, Reinbold V, Delinchant B, Wurtz F. ENERGY BUILDING CO-SIMULATION BASED ON THE WRM ALGORITHM FOR EFFICIENT SIMULATION OVER FMU COMPONENTS OF WEB SERVICE. 2015;8.
36. Pfenninger S, DeCarolis J, Hirth L, Quoilin S, Staffell I. The importance of open data and software: Is energy research lagging behind? *Energy Policy*. 2017;101:211-5.
37. Strachan N, Li P-H. Energy models and transparency [Internet]. UKERC. 2020 [cité 2 mai 2022]. Disponible sur: <https://ukerc.ac.uk/news/energy-models-and-transparency/>
38. Hong T, Chen Y, Luo X, Luo N, Lee SH. Ten questions on urban building energy modeling. *Building and Environment*. 2020;168:106508.
39. Delinchant B. Un environnement à base de composants, intégrant le concepteur et ses outils : pour de nouvelles méthodes de CAO [Internet] [These de doctorat]. Grenoble INPG; 2003 [cité 19 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2003INPG0051>
40. Xin D, Min S. Generalized Hamiltonian Energy Modeling Method for Wireless Power Transfer System. 2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). 2020. p. 1-5.

41. Zhou L, Li J, Li F, Meng Q, Li J, Xu X. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2016;112:3721-34.
42. Fudholi A, Sopian K. R&D of Photovoltaic Thermal (PVT) Systems: an Overview. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018;9:803.
43. Groissböck M. Are open source energy system optimization tools mature enough for serious use? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;102:234-48.
44. Gardumi F, Shivakumar A, Morrison R, Taliotis C, Broad O, Beltramo A, et al. From the development of an open-source energy modelling tool to its application and the creation of communities of practice: The example of OSeMOSYS. *Energy Strategy Reviews*. 2018;20:209-28.
45. Pedrini A, Westphal FS, Lamberts R. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. *Building and Environment*. 2002;37:903-12.
46. Atécopol. Manifeste de l'Atelier d'écologie politique toulousain [Internet]. ATelier d'ÉCOlogie POLitique. 2018 [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: <https://atecopol.hypotheses.org/manifeste-de-latelier-decologie-politique-toulousain>
47. McCormick K, Mont O, Rodhe H, Orsato R, Ryan C, Neij L. Strategies for sustainable solutions: An interdisciplinary and collaborative research agenda. *Journal of Cleaner Production*. 2014;83.
48. UNESCO. Recommandation de l'UNESCO sur une science ouverte [Internet]. Paris, France; 2021. Disponible sur: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949_fre
49. Papastamkou S. Les bonnes pratiques de la science ouverte appliquées aux thèses de doctorat [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://cel.archives-ouvertes.fr/hal-03106243/document>
50. Carvallo S, Ruphy S. Ethique de la recherche [Internet]. FUN MOOC. 2020 [cité 3 juin 2022]. Disponible sur: <http://www.fun-mooc.fr/fr/cours/ethique-de-la-recherche/>
51. Gruson-Daniel C, Jean B. Étude relative à l'ouverture des codes sources au sein de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (ESR) : Considérations en termes d'usage et de valeur. [Internet]. INNO3 ; Etalab ; Comité pour la Science Ouverte; 2021 janv. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03125456>
52. Aigrain P. Cause commune - L'information entre bien commun et propriété. Fayard; 2005.
53. Rawat S, Meena S. Publish or perish: Where are we heading? *J Res Med Sci*. 2014;19:87-9.
54. International Science Council. Open Science for the 21st Century [Internet]. 2020 juin. Disponible sur: https://council.science/wp-content/uploads/2020/06/International-Science-Council_Open-Science-for-the-21st-Century_Working-Paper-2020_compressed.pdf
55. FOSTER. Open Science Training Handbook [Internet]. 2018 [cité 14 janv 2022]. Disponible sur: <https://book.fosteropenscience.eu/>

56. Open Knowledge Foundation. Open Definition 2.1 - Open Definition - Defining Open in Open Data, Open Content and Open Knowledge [Internet]. 2015 [cité 4 janv 2021]. Disponible sur: <https://opendefinition.org/od/2.1/en/>
57. Understanding Free Cultural Works [Internet]. Creative Commons. [cité 22 avr 2022]. Disponible sur: <https://creativecommons.org/share-your-work/public-domain/freeworks/>
58. Wiley D. Defining the « Open » in Open Content and Open Educational Resources [Internet]. [cité 22 avr 2022]. Disponible sur: <https://opencontent.org/definition/>
59. Fecher B, Friesike S. Open Science: One Term, Five Schools of Thought [Internet]. Rochester, NY: Social Science Research Network; 2013 mai. Report No.: ID 2272036. Disponible sur: <https://papers.ssrn.com/abstract=2272036>
60. Ross-Hellauer T. What is open peer review? A systematic review [Internet]. F1000Research; 2017 août. Report No.: 6:588. Disponible sur: <https://f1000research.com/articles/6-588>
61. Bezjak S, Clyburne-Sherin A, Conzett P, Fernandes P, Görögh E, Helbig K, et al. Open Science Training Handbook [Internet]. FOSTER; 2018 [cité 15 févr 2022]. Disponible sur: <https://zenodo.org/record/1212496>
62. Budapest Open Access Initiative. Initiative de Budapest pour l'Accès Ouvert [Internet]. 2002 [cité 6 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.budapestopenaccessinitiative.org/read/french-translation/>
63. Jaeger J, Masselot C, Greshake Tzovaras B, Senabre Hidalgo E, Haklay M, Santolini M. An Epistemology for Democratic Citizen Science. 2022;
64. Collignon B. Que sait-on des savoirs géographiques vernaculaires ? (What do we know about vernacular geographic knowledges). Bulletin de l'Association de Géographes Français. 2005;82:321-31.
65. ECSA (European Citizen Science Association). Ten Principles of Citizen Science [Internet]. Berlin; 2015. Disponible sur: <http://doi.org/10.17605/OSF.IO/XPR2N>
66. DITOs consortium. Citizen Science and Open Science: Synergies and Future Areas of Work. [Internet]. DITOs policy brief 3; 2017 [cité 8 juin 2022]. Disponible sur: https://ecsa.citizen-science.net/wp-content/uploads/2020/03/ditos-policybrief3-20180208-citizen_science_and_open_science_synergies_and_future_areas_of_work.pdf
67. Open Source Hardware Association. Open Source Hardware (OSHW) Définition 1.0 [Internet]. Open Source Hardware Association. [cité 6 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.oshwa.org/definition/french/>
68. Bonvoisin J, Mies R, Boujut J-F. Seven observations and research questions about Open Design and Open Source Hardware. Design Science [Internet]. 2021 [cité 30 nov 2021];7. Disponible sur: <http://www.cambridge.org/core/journals/design-science/article/seven-observations-and-research-questions-about-open-design-and-open-source-hardware/985195D3A9DF51C6B74226087C291E77>
69. CNRS. Feuille de route du CNRS pour la Science Ouverte [Internet]. 2019 [cité 27 nov 2019]. Disponible sur: http://www.science-ouverte.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/11/Plaqueette_Science-Ouverte_18112019.pdf

70. CNRS. Contrat d'objectifs et de performance 2019 - 2023 entre l'État et le Centre National de la Recherche Scientifique [Internet]. 2020 [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: https://www.cnrs.fr/sites/default/files/download-file/COP_CNRS1_0.pdf
71. ADEME, ANR, Anses, INCa, Inserm/ANRS. Déclaration conjointe du réseau des agences de financement françaises en faveur de la science ouverte [Internet]. 2020 [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: <https://anr.fr/fileadmin/documents/2020/Declaration-en-faveur-de-la-Science-Ouverte.pdf>
72. Groupe de travail de l'Académie des sciences sur la science ouverte. Recommandations de l'Académie des sciences pour une mise en pratique des principes de la science ouverte. 2022;15.
73. Legifrance. LOI n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique [Internet]. 2016-1321 oct 7, 2016. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2016/10/7/ECF11524250L/jo/texte>
74. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Le Plan national pour la science ouverte 2021-2024 : vers une généralisation de la science ouverte en France [Internet]. 2021. Disponible sur: <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/le-plan-national-pour-la-science-ouverte-2021-2024-vers-une-generalisation-de-la-science-ouverte-en-48525>
75. Bothorel É, Combes S, Vedel R. Mission Bothorel - Rapport sur la politique publique de la donnée, des algorithmes et des codes sources [Internet]. Gouvernement français; 2020. Disponible sur: https://www.gouvernement.fr/upload/media/default/0001/01/2020_12_rapport_-_pour_une_politique_publicque_de_la_donnee_-_23.12.2020__0.pdf
76. Gouvernement français. Plan d'action logiciels libres et communs numériques [Internet]. 2021 [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: <https://communs.numerique.gouv.fr/plan-action-logiciels-libres-et-communs-numeriques/>
77. Glinos K. Open Science [Internet]. European Union; 2019. Disponible sur: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/knowledge_publications_tools_and_data/documents/ec_rtd_factsheet-open-science_2019.pdf
78. European Commission. Open Science [Internet]. European Commission. 2020 [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/open-science_en
79. European Commission. Open Source Software Strategy 2020 – 2023 - Think Open [Internet]. Communication of the comission; 2020. Disponible sur: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/en_ec_open_source_strategy_2020-2023.pdf
80. BMBF. Bonn Declaration on Freedom of Scientific Research [Internet]. German Federal Ministry of Education and Research; 2020 [cité 4 janv 2021]. Disponible sur: https://www.bmbf.de/files/10_2_2_Bonn_Declaration_en_final.pdf
81. cOAlition S. Plan S Rights Retention Strategy [Internet]. 2018 [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.coalition-s.org/rights-retention-strategy/>
82. UNESCO. Joint Appeal for Open Science [Internet]. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) - World Health Organisation (WHO) - United Nations

- High Commissioner for Human Rights; 2020 oct. Disponible sur: https://en.unesco.org/sites/default/files/joint_appeal_for_open_sciences_fin_en_fin_0.pdf
83. FSFE - Free Software Foundation Europe. EU Open Source Policy: good analysis, missing concrete next steps - FSFE [Internet]. FSFE - Free Software Foundation Europe. 2020 [cité 9 juin 2022]. Disponible sur: <https://fsfe.org/news/2020/news-20201023-01.html>
84. Morrison R. Energy system modeling: Public transparency, scientific reproducibility, and open development. *Energy Strategy Reviews*. 2018;20:49-63.
85. Rohmer S, Troussier N, Reyes T, Matta N. Knowledge engineering and management applied to sustainability and innovation. *AI EDAM*. 2020;34:1-3.
86. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Publications du Baromètre français de la Science Ouverte [Internet]. [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: <https://barometredelascienceouverte.esr.gouv.fr/publications/disciplines?id=disciplines.dynamique-ouverture>
87. Pfenninger S, Hirth L, Schlecht I, Schmid E, Wiese F, Brown T, et al. Opening the black box of energy modelling: Strategies and lessons learned. *Energy Strategy Reviews*. 2018;19:63-71.
88. Morrison R. An Open Energy System Modeling Community [Internet]. <https://genr.eu/wp/>. 2019 [cité 19 déc 2019]. Disponible sur: <https://genr.eu/wp/an-open-energy-system-modeling-community/>
89. openmod. Open Energy Modelling Initiative manifesto [Internet]. 2018 [cité 26 févr 2020]. Disponible sur: <http://openmod-initiative.org/manifesto.html>
90. openmod. Open Models [Internet]. [wiki.openmod-initiative.org](http://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Open_Models). [cité 28 juill 2021]. Disponible sur: https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Open_Models
91. European Commission. Open science monitor [Internet]. European Commission. 2020 [cité 1 juin 2022]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/open-science/open-science-monitor_en
92. Abram S, Winthereik BR, Yarrow T. *Electrifying Anthropology: Exploring Electrical Practices and Infrastructures* [Internet]. Bloomsbury Academic; 2019 [cité 13 juin 2022]. Disponible sur: <http://www.bloomsburycollections.com/book/electrifying-anthropology-exploring-electrical-practices-and-infrastructures>
93. DeCarolis JF, Hunter K, Sreepathi S. The case for repeatable analysis with energy economy optimization models. *Energy Economics*. 2012;34:1845-53.
94. Cao K-K, Cebulla F, Gómez Vilchez JJ, Mousavi B, Prehofer S. Raising awareness in model-based energy scenario studies—a transparency checklist. *Energy, Sustainability and Society*. 2016;6:28.
95. Randall D, Welser C. *The Irreproducibility Crisis of Modern Science: Causes, Consequences, and the Road to Reform* [Internet]. National Association of Scholars; 2018 [cité 3 juin 2022]. Disponible sur: <https://eric.ed.gov/?id=ED600638>
96. Huebner GM, Nicolson ML, Fell MJ, Kennard H, Elam S, Hanmer C, et al. Are we heading towards a replicability crisis in energy efficiency research? A toolkit for improving the quality,

- transparency and replicability of energy efficiency impact evaluations [Internet]. In: Proceedings of the European Council for an Energy Efficient Economy ECEEE 2017 Summer Study on energy efficiency: consumption, efficiency and limits. UKERC: London, UK. 2017 [cité 2 nov 2021]. Disponible sur: <http://www.ukerc.ac.uk/events/eceee-2017-summer-study-on-energy-efficiency-consumption-efficiency-limits.html>
97. The Academy of Medical Sciences. Reproducibility and reliability of biomedical research: improving research practice [Internet]. 2015 oct. Disponible sur: <https://acmedsci.ac.uk/viewFile/56314e40aac61.pdf>
98. Morrison R. An online community for open energy analysis [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://forum.openmod.org/uploads/short-url/g634VJNItZYdFu9CdrRceL0wtPe.pdf>
99. Goodman SN, Fanelli D, Ioannidis JPA. What does research reproducibility mean? *Science Translational Medicine*. 2016;8:341ps12-341ps12.
100. Bazilian M, Rice A, Rotich J, Howells M, DeCarolis J, Macmillan S, et al. Open source software and crowdsourcing for energy analysis. *Energy Policy*. 2012;49:149-53.
101. Savvidis G, Siala K, Weissbart C, Schmidt L, Borggreffe F, Kumar S, et al. The gap between energy policy challenges and model capabilities. *Energy Policy*. 2019;125:503-20.
102. Lopion P, Markewitz P, Robinius M, Stolten D. A review of current challenges and trends in energy systems modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;96:156-66.
103. Hall LMH, Buckley AR. A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Applied Energy*. 2016;169:607-28.
104. Haessig P, Prince Agbodjan JJA, Bourdais R, Guéguen H. Solar home 2020 : enrichissement du benchmark open source de gestion d'énergie avec entrées incertaines. Symposium de Génie Électrique (SGE 2021) [Internet]. Nantes, France; 2021 [cité 21 juin 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03366746>
105. Hilpert S, Kaldemeyer C, Krien U, Günther S, Wingenbach C, Plessmann G. The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling. *Energy Strategy Reviews*. 2018;22:16-25.
106. European Commission. Open Source Software Strategy 2020 – 2023 - Think Open [Internet]. Brussels; 2020. Disponible sur: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/en_ec_open_source_strategy_2020-2023.pdf
107. Weinand JM, Scheller F, McKenna R. Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy. *Energy*. 2020;203:117817.
108. Barnes N. Publish your computer code: it is good enough. *Nature*. 2010;467:753-753.
109. Roth A, Gerbaud V, Boix M, Montastruc L. Holistic framework for land settlement development project sustainability assessment: Comparison of El Hierro Island hydro wind project and Sivens dam project. *Computers & Chemical Engineering*. 2017;100:153-76.
110. Colavizza G, Hrynaszkiewicz I, Staden I, Whitaker K, McGillivray B. The citation advantage of linking publications to research data. *PLOS ONE*. 2020;15:e0230416.

111. Ajila SA, Wu D. Empirical study of the effects of open source adoption on software development economics. *Journal of Systems and Software*. 2007;80:1517-29.
112. Oberle S, Elstrand R. Are open access models able to assess today's energy scenarios? *Energy Strategy Reviews*. 2019;26:100396.
113. Gomez-Diaz T, Recio T. On the evaluation of research software: the CDUR procedure. *F1000Res*. 2019;8:1353.
114. Berendes S, Hilpert S, Günther S, Muschner C, Candas S, Hainsch K, et al. Evaluating the usability of open source frameworks in energy system modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;159:112174.
115. Bauwens T. What roles for energy cooperatives in the diffusion of distributed generation technologies? Available at SSRN 2382596. 2013;
116. Munafò MR, Nosek BA, Bishop DVM, Button KS, Chambers CD, Percie du Sert N, et al. A manifesto for reproducible science. *Nat Hum Behav*. 2017;1:1-9.
117. Dobigny L. Absence de représentations ou Représentation d'une absence? Pour une socio-anthropologie de l'énergie. Poirot-Delpech S & Raineau L Pour une socio-anthropologie de l'environnement, Tome 1 : Par-delà le local et le global. Paris: L'Harmattan; 2012. p. 149-64.
118. Raymond R. Transition énergétique et transdisciplinarité. *Natures Sciences Sociétés*. 2017;Supplément:42-4.
119. Lopez F. L'ordre électrique. Infrastructures énergétiques et territoires. Genève: MétisPresses; 2019.
120. Pehlivanian S. Histoire de l'énergie solaire en France : science, technologies et patrimoine d'une filière d'avenir [Internet] [These de doctorat]. Grenoble; 2014 [cité 11 juin 2022]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2014GRENH023>
121. Serres M. Serment généralisé à l'ensemble des sciences. Temps des crises [Internet]. Manifestes! Le Pommier! 2009 [cité 11 juin 2022]. p. 70-1. Disponible sur: http://www.iuf20ans.org/IMG/pdf/Le-serment_Michel-Serres.pdf
122. Morriet L. Conception multiacteur de systèmes énergétiques locaux bas-carbone : outils, modèles et analyses qualitatives [Internet] [phdthesis]. Université Grenoble Alpes [2020-....]; 2021 [cité 16 juill 2021]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03285666>
123. Missemer A. L'analyse économique face à l'épuisement des ressources naturelles, de William Stanley Jevons à Harold Hotelling (1865-1931) : Le cas des énergies fossiles [Internet] [These de doctorat]. Lyon 2; 2014 [cité 12 juin 2022]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2014LYO22007>
124. Fressoz J-B. POUR UNE HISTOIRE DÉSORIENTÉE DE L'ÉNERGIE. In: Thevenot D, éditeur. 25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question [Internet]. Créteil, France; 2014 [cité 11 juin 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00956441>
125. Fitó J, Hodencq S, Morriet L, Ramousse J, Wurtz F, Debizet G. Decision support for technical design of on-the-spot renewable energy projects involving several stakeholders. Local Energy Communities: Emergence, Places, Organizations, Decision Tools [Internet].

- Routledge & CRC Press. Debizet, Papallardo & Wurtz; 2022 [cité 1 juill 2022]. Disponible sur: <https://www.routledge.com/Local-Energy-Communities-Emergence-Places-Organizations-Decision-Tools/Debizet-Papallardo-Wurtz/p/book/9781032190662>
126. Galvez-Behar G. Aux origines de la propriété scientifique : auctorialité scientifique et propriété intellectuelle au XIXe siècle. 2010 [cité 28 juin 2022]. Disponible sur: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00628341>
127. Galvez-Behar G. Les ' ' communs informationnels ' '. Un point de vue d'historien. Paris, France; 2014. p. 6. Disponible sur: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01009282/document>
128. Galvez-Behar G. Posséder la science. La propriété scientifique au temps du capitalisme industriel [Internet]. Paris: EHESS; 2020 [cité 12 juin 2022]. Disponible sur: <http://journals.openedition.org/lectures/45478>
129. Mahoney MS. The History of Computing in the History of Technology. *Annals of the History of Computing*. 1988;10:113-25.
130. Grimoldi C. Village-scale multi-energy system modelling tools : a review and critical analysis [Internet]. ING - Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione; 2018 [cité 8 avr 2021]. Disponible sur: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/142502>
131. Tavella J-P, Caujolle M, Vialle S, Dad C, Tan C, Plessis G, et al. Toward an accurate and fast hybrid multi-simulation with the FMI-CS standard. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2016. p. 1-5.
132. Alimou Y, Maïzi N, Bourmaud J-Y, Li M. Assessing the security of electricity supply through multi-scale modeling: The TIMES-ANTARES linking approach. *Applied Energy*. 2020;279:115717.
133. Bonneel P, Le Besnerais J, Pile R, Devillers E. Pyleecan: An Open-Source Python Object-Oriented Software for the Multiphysic Design Optimization of Electrical Machines. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2018. p. 948-54.
134. Régner M. Quand l'open data et l'open source deviennent des leviers pour accélérer la transition écologique [Internet]. *The Conversation*. 2021 [cité 12 juin 2022]. Disponible sur: <http://theconversation.com/quand-lopen-data-et-lopen-source-deviennent-des-leviers-pour-accelerer-la-transition-ecologique-161393>
135. The Linux Foundation. Software Defined Vertical Industries: Transformation through Open Source. 2020;26.
136. Srivastava S, Trehan K, Wagle D, Wang J. How software developers can drive business growth | McKinsey [Internet]. McKinsey. 2020 [cité 12 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/developer-velocity-how-software-excellence-fuels-business-performance>
137. Wurtz F. Conceptions de la conception pour le génie électrique : de l'approche " Objets - Savoirs - Méthodes - Outils " à l'approche " Systèmes - Connaissances - Compétences - Organisations [Internet] [thesis]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG; 2008 [cité 4 nov 2020]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00728244>

138. Le Moigne J-L. Les Épistémologies constructivistes. Que sais-je; 1999.
139. Morin E. La Méthode 3. La Connaissance de la Connaissance. Seuil; 1986.
140. Visser W. Dynamic Aspects of Design Cognition: Elements for a Cognitive Model of Design [Internet]. Rocquencourt: INRIA; 2004 p. 55-7. Report No.: 5144. Disponible sur: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/075910639203700105>
141. Pfenninger S. Energy scientists must show their workings. Nature. 2017;542:393-393.
142. Cabin P, Choc B. Les organisations - Etat des savoirs. Editions Sciences Humaines; 2005.
143. Simon HA. Models of man; social and rational. Oxford, England: Wiley; 1957.
144. Nonaka I. A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation. Organization Science. 1994;5:14-37.
145. Vinck D. La connaissance : ses objets et ses institutions. 1997. p. 55-91.
146. Grundstein M. De la capitalisation des connaissances au management des connaissances dans l'entreprise. 2004 [cité 12 févr 2022]; Disponible sur: <https://basepub.dauphine.psl.eu/handle/123456789/2620>
147. Socialter HN. L'avenir sera Low-Tech [Internet]. 2019 [cité 14 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.socialter.fr/produit/hors-serie-n-6>
148. Schumacher EF. Small is Beautiful - Economics as if people mattered [Internet]. HarperCollins. 1973 [cité 14 juin 2022]. Disponible sur: https://sciencepolicy.colorado.edu/students/envs_5110/small_is_beautiful.pdf
149. Illich I. Tools for conviviality. 1973.
150. Dessendier E, Rozenholc A. Un premier pas vers un changement radical du mode de production. EcoRev'. 2013;41:17-27.
151. Bookchin M. Vers une technologie libératrice [Internet]. 1965 [cité 14 juin 2022]. Disponible sur: <https://fr.theanarchistlibrary.org/library/murray-bookchin-vers-une-technologie-liberatrice>
152. Mumford L. Technique autoritaire et technique démocratique. Editions La Lenteur; 1963.
153. Durand M, Cavé J, Pierrat A. Quand le low-tech fait ses preuves : la gestion des déchets dans les pays du Sud. Revue Urbanités [Internet]. 2019 [cité 28 août 2020]; Disponible sur: <https://www.revue-urbanites.fr/12-durand-cave-pierrat/>
154. Trompette P. Les innovations low techs en circulation et en usage [Internet]. Grenoble; 2020. Disponible sur: https://pad.lescommuns.org/annuaire_pad_LowTRE_06_10#32--Les-innovations-Low-Tech-en-circulation-et-en-usage
155. Low-tech Lab – Les Low-tech : l'innovation utile, accessible et durable. [Internet]. [cité 30 juin 2022]. Disponible sur: <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech>
156. Bonjean A-C, Fangeat E, ADEME, Forget A, Fustec A, Habe C, et al. État des lieux et perspectives des démarches « low-tech ». [Internet]. ADEME; 2022 p. 52. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5421-demarches-low-tech.html>

157. Bihouix P. L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable: Vers une civilisation techniquement soutenable. Le Seuil; 2014.
158. Alexander S, Yacoumis P. Degrowth, energy descent, and 'low-tech' living: Potential pathways for increased resilience in times of crisis. *Journal of Cleaner Production*. 2018;197:1840-8.
159. Kostakis V, Latoufis K, Liarokapis M, Bauwens M. The convergence of digital commons with local manufacturing from a degrowth perspective: Two illustrative cases. *Journal of Cleaner Production*. 2018;197:1684-93.
160. Florentin D, Ruggeri C. #12 / Édito : ville (s)low tech et quête d'une modernité écologique : Urbanités [Internet]. 2019 [cité 5 févr 2020]. Disponible sur: <http://www.revue-urbanites.fr/12-edito/>
161. Martin A, Colin C. Ergonomie et low-tech. Représentations et attitudes vis-à-vis du low-tech. Intention d'utilisation et problèmes perçus pour 10 low-techs. Low-Tech Lab; 2021.
162. Meyer M. Experimenting and documenting low tech. *Technology Analysis & Strategic Management*. 2021;33:1147-58.
163. EcoSD. Projet de Recherche Collaboratif (PRC) « Viabilité Low-tech » [Internet]. [cité 14 juin 2022]. Disponible sur: <https://lowtri.github.io/#PRC>
164. Carrey J, Lachaize S. La recherche scientifique en Low-Tech : définition, réflexions sur les pistes possibles, et illustration avec un projet de métallurgie solaire. *La Pensee ecologique*. 2020;N° 5:7-7.
165. CNRS, IRD. Sciences frugales et innovation basse technologie (Low-Tech) – MITI [Internet]. 2021 [cité 4 juill 2022]. Disponible sur: <https://miti.cnrs.fr/appele-projet/sciences-frugales/>
166. Troullaki A, Latoufis K, Marques P, Freire F, Hatziargyriou N. Life Cycle Assessment of Locally Manufactured Small Wind Turbines and Pico-Hydro Plants. 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST) [Internet]. Porto, Portugal: IEEE; 2019 [cité 18 juin 2020]. p. 1-6. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8849074/>
167. Ferretti A. Collectif Bam | Du design thérapeutique [Internet]. Collectif Bam. 2018 [cité 28 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.collectifbam.fr>
168. Guimbretière G, Hodencq S, Balland M. Une approche de la Low-tech dans l'Enseignement Supérieur et la Recherche [Internet]. *La pensée écologique*. 2022 [cité 14 juin 2022]. Disponible sur: <https://lapenseeecologique.com/une-approche-de-la-low-tech-dans-lenseignement-superieur-et-la-recherche/>
169. Pestre D. Introduction aux Science Studies [Internet]. *La Découverte*. 2006. Disponible sur: <https://doi.org/10.3917/dec.pestr.2006.01>
170. Hodencq S. Science Ouverte [Internet]. Grenoble, France; 2021 [cité 3 juin 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03470763>

171. Hülk L, Müller B, Glauer M, Förster E, Schachler B. Transparency, reproducibility, and quality of energy system analyses – A process to improve scientific work. *Energy Strategy Reviews*. 2018;22:264-9.
172. European Union. Open access - H2020 Online Manual [Internet]. 2020 [cité 7 janv 2021]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/research/participants/docs/h2020-funding-guide/cross-cutting-issues/open-access-data-management/open-access_en.htm
173. Rubin DB. Statistical disclosure limitation. *Journal of official Statistics*. 1993;9:461-8.
174. CESSDA Training Team. CESSDA Data Management Expert Guide. 2020 [cité 26 avr 2022]; Disponible sur: <https://zenodo.org/record/3820473>
175. Nowogrodzki A. TIPS FOR OPEN-SOURCE SOFTWARE SUPPORT. *Nature*. 2019;571:133-4.
176. Comité pour la Science Ouverte, collège Compétences & Formation, Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche, Université de Lille. Science ouverte : entrez dans le débat (1ère édition). Guide thématique décliné du Passeport pour la science ouverte [Internet]. 2022. Disponible sur: <https://www.ouvrirelascience.fr/science-ouverte-entrez-dans-le-debat/>
177. Broca S, Coriat B. Le logiciel libre et les communs. Deux formes de résistance et d'alternative à l'exclusivisme propriétaire. *Revue internationale de droit économique*. 2015;t. XXIX:265-84.
178. Gomez-Diaz T. Article vs. Logiciel : questions juridiques et de politique scientifique dans la production de logiciels. 1024: Bulletin de la Société Informatique de France. 2015;<http://www.societe-informatique-de-france.fr/bulletin/1024-numero-5/>.
179. Robbie Morrison. Open source software and open data: open licensing of software and data for public policy analysis and for collaborative research — Release 03 [Internet]. 2021 [cité 17 mars 2021]. Disponible sur: <https://zenodo.org/record/4537157#.YFHFidzjI2w>
180. Pritoni M, Paine D, Fierro G, Mosiman C, Poplawski M, Saha A, et al. Metadata Schemas and Ontologies for Building Energy Applications: A Critical Review and Use Case Analysis. *Energies*. 2021;14:2024.
181. Wilkinson MD, Dumontier M, Aalbersberg IJ, Appleton G, Axton M, Baak A, et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*. 2016;3:160018.
182. Wierling A, Schwanitz VJ, Altinci S, Bałazińska M, Barber MJ, Biresselioglu ME, et al. FAIR Metadata Standards for Low Carbon Energy Research—A Review of Practices and How to Advance. *Energies*. 2021;14:6692.
183. Studer R, Benjamins VR, Fensel D. Knowledge engineering: Principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*. 1998;25:161-97.
184. Booshehri M, Emele L, Flügel S, Förster H, Frey J, Frey U, et al. Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI*. 2021;5:100074.

185. Di Cosmo R. Archiving and Referencing Source Code with Software Heritage. In: Bigatti AM, Carette J, Davenport JH, Joswig M, de Wolff T, éditeurs. *Mathematical Software – ICMS 2020*. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 362-73.
186. Candela L, Castelli D, Manghi P, Tani A. Data journals: A survey. *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2015;66:1747-62.
187. Open Energy Platform (OEP) [Internet]. 2018 [cité 19 juill 2021]. Disponible sur: <https://openenergy-platform.org/>
188. Hodencq S, Brugeron M, Fitó J, Morriet L, Delinchant B, Wurtz F. OMEGAAlpes, an Open-Source Optimisation Model Generation Tool to Support Energy Stakeholders at District Scale. *Energies*. 2021;14:5928.
189. The dogfood question: do openmoders reuse code? - Modelling / Open modelling [Internet]. Open Energy Modelling Initiative. 2020 [cité 27 avr 2022]. Disponible sur: <https://forum.openmod.org/t/the-dogfood-question-do-openmoders-reuse-code/1890>
190. Süsser D, Gaschnig H, Ceglaz A, Stavrakas V, Flamos A, Lilliestam J. Better suited or just more complex? On the fit between user needs and modeller-driven improvements of energy system models. *Energy*. 2022;239:121909.
191. Widl E, Delinchant B, Kübler S, Li D, Müller W, Norrefeldt V, et al. Novel simulation concepts for buildings and community energy systems based on the Functional Mock-up Interface specification. 2014 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES). 2014. p. 1-6.
192. Candas S, Muschner C, Buchholz S, Bramstoft R, van Ouwerkerk J, Hainsch K, et al. Code exposed: Review of five open-source frameworks for modeling renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:112272.
193. Pajot C, Artiges N, Delinchant B, Rouchier S, Wurtz F, Maréchal Y. An Approach to Study District Thermal Flexibility Using Generative Modeling from Existing Data. *Energies*. 2019;12:3632.
194. van Beuzekom I, Gibescu M, Slootweg JG. A review of multi-energy system planning and optimization tools for sustainable urban development. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. 2015. p. 1-7.
195. Limpens G, Moret S, Jeanmart H, Maréchal F. EnergyScope TD: A novel open-source model for regional energy systems. *Applied Energy*. 2019;255:113729.
196. Allegrini J, Orehounig K, Mavromatidis G, Ruesch F, Dorer V, Evins R. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;52:1391-404.
197. Delinchant B. La CAO et l'optimisation de systèmes, une approche par couplages dynamiques de composants [Internet] [thesis]. Université de Grenoble; 2011 [cité 2 juin 2022]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00677457>
198. Zimmer L, Zablitz P. « Global aircraft » pre-design based on constraint propagation and interval analysis. 2001.

199. Hollberg A, Götz M, Lichtenheld T, Hollberg P, Alina G, Habert G. Improving the Collaboration between Architects and Energy Consultants through Design-integrated early BIM-tools. Rome, Italy; 2019 [cité 20 juill 2021]. p. 2627-33. Disponible sur: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_210365.pdf
200. Delhommais M. Preliminary Design Method in Power Electronics. Université Grenoble Alpes; 2019.
201. Fernandez M, Mistree F, Allen J. A Decision Support Framework for Distributed Collaborative Design and Manufacture. 2002.
202. Trčka M, Hensen JLM. Overview of HVAC system simulation. *Automation in Construction*. 2010;19:93-9.
203. Ringkjøb H-K, Haugan PM, Solbrekke IM. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;96:440-59.
204. Pfenninger S, Hawkes A, Keirstead J. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;33:74-86.
205. Andarini R. The Role of Building Thermal Simulation for Energy Efficient Building Design. *Energy Procedia*. 2014;47:217-26.
206. Mauree D, Perera ATD, Scartezzini J-L. Influence of Buildings Configuration on the Energy Demand and Sizing of Energy Systems in an Urban Context. *Energy Procedia*. 2017;142:2648-54.
207. Robinson D, Haldi F, Leroux P, Perez D, Rasheed A, Wilke U. CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning. *Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference [Internet]*. 2009 [cité 29 juill 2021]. p. 1083. Disponible sur: <https://infoscience.epfl.ch/record/148717>
208. Riederer P, Partenay V, Perez N, Nocito C, Trigance R, Guiot T. Development of a simulation platform for the evaluation of district energy system performances. 2015 [cité 29 juill 2021]; Disponible sur: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.4668.8401/1>
209. Baños R, Manzano-Agugliaro F, Montoya FG, Gil C, Alcayde A, Gómez J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:1753-66.
210. Rigo-Mariani R, Chea Wae SO, Mazzoni S, Romagnoli A. Comparison of optimization frameworks for the design of a multi-energy microgrid. *Applied Energy*. 2020;257:113982.
211. urbs: A linear optimisation model for distributed energy systems — urbs 1.0.0 documentation [Internet]. [cité 28 juill 2021]. Disponible sur: <https://urbs.readthedocs.io/en/latest/>
212. Howells M, Rogner H, Strachan N, Heaps C, Huntington H, Kypreos S, et al. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy*. 2011;39:5850-70.
213. Pajot C, Morriet L, Hodencq S, Delinchant B, Maréchal Y, Wurtz F, et al. An Optimization Modeler as an Efficient Tool for Design and Operation for City Energy Stakeholders and

- Decision Makers. Building Simulation 2019 [Internet]. Rome, Italy; 2019 [cité 2 déc 2019]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285954>
214. DeCarolis J, Daly H, Dodds P, Keppo I, Li F, McDowall W, et al. Formalizing best practice for energy system optimization modelling. *Applied Energy*. 2017;194:184-98.
215. Wiese F, Bramstoft R, Koduvere H, Pizarro Alonso A, Balyk O, Kirkerud JG, et al. Balmorel open source energy system model. *Energy Strategy Reviews*. 2018;20:26-34.
216. Loulou R, Labriet M. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure. *CMS*. 2008;5:7-40.
217. Loulou R. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. part II: mathematical formulation. *CMS*. 2008;5:41-66.
218. Brown T, Horsch J, Schlachtberger D. Python for Power System Analysis (PyPSA): Free Software for Planning Energy Systems with High Shares of Renewables. India; 2017. p. 6.
219. Cutler D, Olis D, Elgqvist E, Li X, Laws N, DiOrio N, et al. REopt: A Platform for Energy System Integration and Optimization. *Renewable Energy*. 2017;75.
220. Artelys Crystal Energy Planner [Internet]. Artelys. 2016 [cité 14 déc 2018]. Disponible sur: <https://www.artelys.com/fr/applications/artelys-energy-planner>
221. ficus: A (mixed integer) linear optimisation model for local energy systems — ficus 0.1 documentation [Internet]. 2018 [cité 14 déc 2018]. Disponible sur: <https://ficus.readthedocs.io/en/latest/>
222. Dorfner J. Open Source Modelling and Optimisation of Energy Infrastructure at Urban Scale. 2016.
223. Sayegh H. Holistic optimization of buildings based on the evaluation of annual performances from short simulation sequences [Internet] [phdthesis]. Université savoie mont blanc; 2020 [cité 22 juill 2021]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03219964>
224. Roy A, Auger F, Dupriez-Robin F, Bourguet S, Tran QT. A multi-level Demand-Side Management algorithm for offgrid multi-source systems. *Energy*. 2020;191:116536.
225. Zhou N, Huang Z, Meng D, Elbert ST, Wang S, Diao R. Capturing Dynamics in the Power Grid: Formulation of Dynamic State Estimation through Data Assimilation [Internet]. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States); 2014 mars. Report No.: PNNL-23213. Disponible sur: <https://www.osti.gov/biblio/1172467>
226. Morvaj B, Evins R, Carmeliet J. Optimization framework for distributed energy systems with integrated electrical grid constraints. *Applied Energy*. 2016;171:296-313.
227. Lund H, Østergaard PA, Connolly D, Mathiesen BV. Smart energy and smart energy systems. *Energy*. 2017;137:556-65.
228. Kleppe AG, Warmer J, Warmer JB, Bast W. MDA Explained: The Model Driven Architecture : Practice and Promise. Addison-Wesley Professional; 2003.
229. Wetter M, Zuo W, Nouidui TS, Pang X. Modelica Buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*. 2014;7:253-70.

230. Ferrari S, Zagarella F, Caputo P, Bonomolo M. Assessment of tools for urban energy planning. *Energy*. 2019;176:544-51.
231. Queiroz F, Silva R, Miller J, Brockhauser S, Fangohr H. Good Usability Practices in Scientific Software Development. arXiv:170900111 [cs]. 2017;376271 Bytes.
232. Rampersad L, Blyth S, Elson E, Kuttel MM. Improving the usability of scientific software with participatory design: a new interface design for radio astronomy visualisation software. *Proceedings of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists [Internet]*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2017 [cité 2 mai 2022]. p. 1–9. Disponible sur: <https://doi.org/10.1145/3129416.3129899>
233. Süsler D, al Rakouki H, Lilliestam J. The QTDIAN modelling toolbox–Quantification of social drivers and constraints of the diffusion of energy technologies. Deliverable 2.3. Sustainable Energy Transitions Laboratory (SENTINEL) project | Institute for Advanced Sustainability Studies [Internet]. SENTINEL project - European Union; 2021 juin p. 94. Disponible sur: <https://www.ias-potsdam.de/de/ergebnisse/publikationen/2021/qtdian-modelling-toolbox-quantification-social-drivers-and>
234. Pickering B, Roelfsema M, Mikropoulos M, Chang M, Thellufsen JZ, van Vuuren D. Model development to match system design models to user needs. Deliverable 4.2. Sustainable Energy Transitions Laboratory (SENTINEL) projec [Internet]. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ); 2021. Disponible sur: <https://sentinel.energy/wp-content/uploads/2021/03/D4.2-EC.pdf>
235. Morriet L, Debizet G, Wurtz F. Multi-actor modelling for MILP energy systems optimisation: application to collective self-consumption. 2019;8.
236. Süsler D, Ceglaz A, Gaschnig H, Stavrakas V, Flamos A, Giannakidis G, et al. Model-based policymaking or policy-based modelling? How energy models and energy policy interact. *Energy Research & Social Science*. 2021;75:101984.
237. Hubert A, Yvars P-A, Meyer Y, Zimmer L. Conception préliminaire optimale des systèmes électriques. Une approche par synthèse. *Symposium de Genie Electrique*. Grenoble, France; 2016. p. 9.
238. Godjo T, Boujut J-F, Marouzé C, Giroux F. A participatory design approach based on the use of scenarios for improving local design methods in developing countries. 2015;29.
239. Latoufis K, Pazios T, Chira K, Korres N, Hatziaargyriou N. Open Design and Local Manufacturing of Small Wind Turbines: Case Studies in Ethiopia and Nepal. 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica. 2018. p. 148-53.
240. Agobert L, Hodencq S, DELINCHANT B, Gerbaud L, Frederic W. NoLOAD, Open Software for Optimal Design and Operation using Automatic Differentiation. OIPE2020 - 16th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism [Internet]. Online, France; 2021 [cité 6 mai 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03352443>
241. Hodencq S, Delinchant B, Wurtz F. Vers l’ouverture des modèles d’optimisation de systèmes énergétiques pour l’Analyse de Cycle de Vie: cas d’étude d’un foyer en autoconsommation photovoltaïque avec l’outil open source NoLOAD. SYMPOSIUM DE

GENIE ELECTRIQUE (SGE 2020) [Internet]. Nantes, France; 2020 [cité 23 juill 2021]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03290015>

242. Reinbold V, Dinh V-B, Tenfen D, Delinchant B, Saelens D. Optimal operation of building microgrids – comparison with mixed-integer linear and continuous non-linear programming approaches. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2018;37:603-16.

243. Pajot C. OMEGAlpes : Outil d'aide à la décision pour une planification énergétique multi-fluides optimale à l'échelle des quartiers. Université Grenoble Alpes; 2019.

244. Brugeron M. Principes et développement d'un outil de création générique de contrôleurs prédictifs optimisés pour la gestion énergétique à l'échelle quartier [Internet] [phdthesis]. Université Grenoble Alpes [2020-....]; 2021 [cité 24 mai 2022]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03529210>

245. Apache Software Foundation. Apache License, Version 2.0 [Internet]. Apache; 2004. Disponible sur: <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0.html>

246. Delinchant B, Hodencq S, Marechal Y, Morriet L, Pajot C, Wurtz F. OMEGAlpes' documentation [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://omegalpes.readthedocs.io/en/latest/>

247. Mitchell S, O'Sullivan M, Dunning I. PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python. 2011;12.

248. Koch T, Achterberg T, Andersen E, Bastert O, Berthold T, Bixby RE, et al. MIPLIB 2010: Mixed Integer Programming Library version 5. *Mathematical Programming Computation*. 2011;3:103-63.

249. OEP - OMEGAlpes factsheet [Internet]. 2021 [cité 29 juill 2021]. Disponible sur: <https://openenergy-platform.org/factsheets/frameworks/186/>

250. Pickering B, Ikeda S, Choudhary R, Ooka R. Comparison of Metaheuristic and Linear Programming Models for the Purpose of Optimising Building Energy Supply Operation Schedule. 2016;11.

251. Eco-SESA. RETHINE - ADEME [Internet]. Eco-SESA. 2022 [cité 24 mai 2022]. Disponible sur: <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/eco-sesa-program/community-labelled-projects/https%3A%2F%2Fecosesa.univ-grenoble-alpes.fr%2Feco-sesa-program%2Fcommunity-labelled-projects%2Frethine-772896.kjsp%3FRH%3D1537860620572>

252. Fitó J, Hodencq S, Ramousse J, Wurtz F, Stutz B, Debray F, et al. Optimisations énergétique et exergetique de la conception d'un système de valorisation de chaleur fatale industrielle basse température sur réseau de chaleur. 2020 [cité 3 nov 2020]; Disponible sur: <https://www.sft.asso.fr/DOIeditions/CFT2020/Abstracts/p98.html>

253. Fitó J, Ramousse J, Hodencq S, Wurtz F. Energy, exergy, economic and exergoeconomic (4E) multicriteria analysis of an industrial waste heat valorization system through district heating. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;42:100894.

254. Fito J, Hodencq S, Ramousse J, Wurtz F, Stutz B, Debray F, et al. Energy- and exergy-based optimal designs of a low-temperature industrial waste heat recovery system in district heating. *Energy Conversion and Management*. 2020;211:112753.

255. Hodencq S, Fitó J, Debray F, Vincent B, Ramousse J, Delinchant B, et al. Flexible waste heat management and recovery for an electro-intensive industrial process through energy/exergy criteria. Proceedings of Ecos 2021 - The 34th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems [Internet]. Taormina, Italy; 2021 [cité 23 juill 2021]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03290126>
256. Pfenninger S, Pickering B. Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework. *Journal of Open Source Software*. 2018;3:825.
257. Heider A, Reibsch R, Blechinger P, Linke A, Hug G. Flexibility options and their representation in open energy modelling tools. *Energy Strategy Reviews*. 2021;38:100737.
258. Buckheit JB, Donoho DL. WaveLab and Reproducible Research. In: Antoniadis A, Oppenheim G, éditeurs. *Wavelets and Statistics* [Internet]. New York, NY: Springer New York; 1995 [cité 26 nov 2021]. p. 55-81. Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4612-2544-7_5
259. Ince DC, Hatton L, Graham-Cumming J. The case for open computer programs. *Nature*. 2012;482:485-8.
260. Barba LA. Terminologies for Reproducible Research. arXiv:180203311 [cs] [Internet]. 2018 [cité 25 févr 2022]; Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/1802.03311>
261. Plesser HE. Reproducibility vs. Replicability: A Brief History of a Confused Terminology. *Frontiers in Neuroinformatics* [Internet]. 2018 [cité 25 févr 2022];11. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fninf.2017.00076>
262. Huebner GM, Fell MJ, Watson NE. Improving energy research practices: guidance for transparency, reproducibility and quality. *Buildings and Cities*. 2021;2:1–20.
263. Leonelli S. Rethinking Reproducibility as a Criterion for Research Quality. Including a Symposium on Mary Morgan: Curiosity, Imagination, and Surprise [Internet]. Emerald Publishing Limited; 2018 [cité 19 mars 2022]. p. 129-46. Disponible sur: <https://doi.org/10.1108/S0743-41542018000036B009>
264. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Reproducibility and Replicability in Science [Internet]. Washington, DC: The National Academies Press; 2019 [cité 3 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.nap.edu/catalog/25303/reproducibility-and-replicability-in-science>
265. Peng RD. Reproducible Research in Computational Science. *Science*. 2011;334:1226-7.
266. Kitzes J, Turek D, Deniz F. The Practice of Reproducible Research: Case Studies and Lessons from the Data-Intensive Sciences [Internet]. Oakland: University of California Press; 2018 [cité 3 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.practicereproducibleresearch.org/>
267. Knuth DE. Literate Programming. *The Computer Journal*. 1984;27:97-111.
268. Daly T. Example of Literate Programming in HTML [Internet]. [cité 4 avr 2022]. Disponible sur: <http://www.axiom-developer.org/axiom-website/litprog.html>

269. Lau S, Drosos I, Markel JM, Guo PJ. The Design Space of Computational Notebooks: An Analysis of 60 Systems in Academia and Industry. 2020 IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC). 2020. p. 1-11.⁵⁰
270. Fog BV, Klokmose CN. Mapping the Landscape of Literate Computing. Proceedings of the 30th Annual Workshop of the Psychology of Programming Interest Group. PPIG; 2019. p. 10.
271. Pimentel JF, Murta L, Braganholo V, Freire J. Understanding and improving the quality and reproducibility of Jupyter notebooks. *Empir Software Eng.* 2021;26:65.
272. Perret A. Du notebook au bloc-code [Internet]. arthurperret.fr. 2021 [cité 13 avr 2022]. Disponible sur: <https://www.arthurperret.fr/blog/2021-06-11-du-notebook-au-bloc-code.html>
273. Ovadia S. Markdown for Librarians and Academics. *Behavioral & Social Sciences Librarian.* 2014;33:120-4.
274. Randles BM, Pasquetto IV, Golshan MS, Borgman CL. Using the Jupyter Notebook as a Tool for Open Science: An Empirical Study. 2017 ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries (JCDL). 2017. p. 1-2.
275. Kery MB, Radensky M, Arya M, John BE, Myers BA. The Story in the Notebook: Exploratory Data Science using a Literate Programming Tool. Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems [Internet]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2018 [cité 12 avr 2022]. p. 1–11. Disponible sur: <https://doi.org/10.1145/3173574.3173748>
276. Rule A, Tabard A, Hollan JD. Exploration and Explanation in Computational Notebooks. Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems [Internet]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2018 [cité 13 avr 2022]. p. 1–12. Disponible sur: <https://doi.org/10.1145/3173574.3173606>
277. Herbet M-E, Léonard J, Santangelo MG, Albaret L. Dissimuler ou disséminer ? Une étude sur le sort réservé aux résultats négatifs [Internet]. Zenodo; 2021 sept. Disponible sur: <https://zenodo.org/record/5541589>
278. Chattopadhyay S, Prasad I, Henley AZ, Sarma A, Barik T. What's Wrong with Computational Notebooks? Pain Points, Needs, and Design Opportunities. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems [Internet]. Honolulu HI USA: ACM; 2020 [cité 4 avr 2022]. p. 1-12. Disponible sur: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3313831.3376729>
279. Wilson G. Software Carpentry: Getting Scientists to Write Better Code by Making Them More Productive. *Computing in Science Engineering.* 2006;8:66-9.

⁵⁰ © 2020 IEEE. Reprinted, with permission, from Lau S, Drosos I, Markel JM, Guo PJ. The Design Space of Computational Notebooks: An Analysis of 60 Systems in Academia and Industry. 2020. In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of UGA's products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

280. Pouyllau S. Callisto, un démonstrateur Jupyter pour les SHS [Internet]. HN Lab Log. [cité 19 avr 2022]. Disponible sur: <https://hnlab.huma-num.fr/blog/2021/05/26/callisto-un-demonstrateur-jupyter/>
281. Œil oudjat [Internet]. Wikipédia. 2021 [cité 17 mars 2022]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C5%92il_oudjat&oldid=187205076
282. Hodencq S, Delinchant B, Wurtz F. Open and Reproducible Use Cases for Energy (ORUCE) methodology in systems design and operation: a dwelling photovoltaic self-consumption example. Building Simulation 2021 [Internet]. Bruges, Belgium; 2021 [cité 16 sept 2021]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03341883>
283. Nguyen DV, Delinchant B, Dinh BV, Nguyen TX. Irradiance forecast model for PV generation based on cloudiness web service. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;307:012008.
284. Gaaloul Chouikh S. Interopérabilité sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation énergétique des systèmes de bâtiment [Internet] [These de doctorat]. Grenoble; 2012 [cité 15 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2012GRENT063>
285. INRAE, DipSO. Publier un Data Paper pour valoriser ses données [Internet]. Infodoc Express; 2018 [cité 15 juin 2022]. Disponible sur: https://ist.inrae.fr/wp-content/uploads/sites/21/2020/09/Infodoc_DataPaper_2020.pdf
286. Project Jupyter [Internet]. [cité 11 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.jupyter.org>
287. Vinck D. De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. Vers la prise en compte du travail d'équipement. Revue d'anthropologie des connaissances. 2009;3, 1:51-72.
288. Eynard-Bontemps G, Abernathey R, Hamman J, Ponte A, Rath W. The Pangeo Big Data Ecosystem and its use at CNES. 2019 [cité 22 févr 2022]. Disponible sur: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00503/61441/>
289. Boettiger C. An introduction to Docker for reproducible research. SIGOPS Oper Syst Rev. 2015;49:71-79.
290. Courtès L. Towards reproducible Jupyter notebooks [Internet]. GUIX HPC. 2019 [cité 23 févr 2022]. Disponible sur: <https://hpc.guix.info/blog/2019/10/towards-reproducible-jupyter-notebooks/>
291. Artifact Review and Badging - Version 1.1 [Internet]. Association for Computing Machinery. 2020 [cité 24 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.acm.org/publications/policies/artifact-review-and-badging-current>
292. Courtès L. Reproduire les environnements logiciels : un maillon incontournable de la recherche reproductible. 1024 : Bulletin de la Société Informatique de France. 2021;15.
293. Sandve GK, Nekrutenko A, Taylor J, Hovig E. Ten Simple Rules for Reproducible Computational Research. PLOS Computational Biology. 2013;9:e1003285.
294. Pauliuk S, Majeau-Bettez G, Mutel CL, Steubing B, Stadler K. Lifting Industrial Ecology Modeling to a New Level of Quality and Transparency: A Call for More Transparent Publications and a Collaborative Open Source Software Framework. Journal of Industrial Ecology. 2015;19:937-49.

295. Chen X, Dallmeier-Tiessen S, Dasler R, Feger S, Fokianos P, Gonzalez JB, et al. Open is not enough. *Nature Phys.* 2019;15:113-9.
296. Rey-Coyrehourcq S, Cura R, Nuninger L, Gravier J, Nahassia L, Hachi R. Vers une recherche reproductible dans un cadre interdisciplinaire: enjeux et propositions pour le transfert du cadre conceptuel et la réplication des modèles. In: L S, éditeur. *Peupler la terre De la préhistoire à l'ère des métropoles* [Internet]. Presses universitaires François Rabelais; 2017 [cité 1 mars 2022]. p. 409-34. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01677950>
297. Inno3. Grille de critères de valorisation [Internet]. 2019 [cité 7 juin 2022]. Disponible sur: <https://inno3.fr/actualite/conjuguer-open-source-et-science-ouverte-opportunités-et-leviers-daction>
298. Heating - Fuels & Technologies [Internet]. IEA. [cité 14 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/heating>
299. Brückner S, Liu S, Miró L, Radspieler M, Cabeza LF, Lävemann E. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy.* 2015;151:157-67.
300. La Chaleur fatale [Internet]. ADEME; 2017. Disponible sur: <https://www.ademe.fr/chaleur-fatale>
301. Datalab. Chiffres clés de l'énergie [Internet]. 2021 [cité 16 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/livre>
302. Hampikian Z. 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* [Internet]. 2017 [cité 24 févr 2020]; Disponible sur: <http://journals.openedition.org/developpementdurable/11736>
303. Frederiksen S, Werner S. Heat recycling from industrial processes. *District Heating and Cooling. Studentlitteratur;* 2013. p. 195-203.
304. Hodencq S, Debray F, Trophime C, Vincent B, Stutz B, Delinchant B, et al. Thermohydraulique des champs magnétiques intenses : des microns jusqu'à l'échelle des communautés urbaines. 24ème Congrès Français de la Mécanique [Internet]. Brest, France; 2019 [cité 12 mars 2021]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02485061>
305. Les réseaux de chaleur et de froid - Chiffres clés, analyses et évolution [Internet]. Fedene - SNCU; 2019. Disponible sur: <https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2019/12/SNCU-Rapport-Global-2019-Restitution-enquete-r%C3%A9seaux.pdf>
306. European Commission. Improving the sustainability of the European Magnetic Field Laboratory | ISABEL Project | H2020 [Internet]. 2020 [cité 17 mars 2022]. Disponible sur: <https://cordis.europa.eu/project/id/871106/fr>
307. Pajot C, Delinchant B, Maréchal Y, Wurtz F, Morriet L, Vincent B, et al. Industrial Optimal Operation Planning with Financial and Ecological Objectives: Proceedings of the 7th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems [Internet]. Funchal, Madeira, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications; 2018 [cité 29 oct 2019]. p. 214-22.

- Disponible sur: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006705202140222>
308. Pajot C, Nguyen Q, Delinchant B, Maréchal Y, Wurtz F, Robin S, et al. Data-driven Modeling of Building Consumption Profile for Optimal Flexibility: Application to Energy Intensive Industry. Building Simulation Conference 2019 [Internet]. Rome, Italy; 2019 [cité 17 déc 2019]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02364669>
309. Morriet L, Debizet G, Wurtz F. Multi-actor modelling for MILP energy systems optimisation: application to collective self-consumption [Internet]. 2019 [cité 22 oct 2021]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285965>
310. Hodencq S, Morriet L, Wurtz F, Delinchant B, Vincent B, Debray F. Science ouverte pour l'optimisation de systèmes énergétiques : des données et modèles ouverts à une infrastructure de recherche ouverte. Conférence IBPSA France [Internet]. Reims, France; 2020 [cité 23 juill 2021]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03290009>
311. Brueckner S, Miró L, Cabeza LF, Pehnt M, Laevemann E. Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38:164-71.
312. ADEME. Site Bilans GES [Internet]. [cité 16 juin 2022]. Disponible sur: <https://bilans-ges.ademe.fr/>
313. Añel JA, Fernández-González M, Labandeira X, López-Otero X, De la Torre L. Impact of Cold Waves and Heat Waves on the Energy Production Sector. *Atmosphere*. 2017;8:209.
314. Debizet G, Tabourdeau A, Gauthier C, Menanteau P. Spatial processes in urban energy transitions: considering an assemblage of Socio-Energetic Nodes. *Journal of Cleaner Production*. 2016;134:330-41.
315. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Minx JC, Farahani E, Kadner S, et al. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014;1454.
316. ADEME. Le solaire photovoltaïque [Internet]. Les avis de l'ADEME; 2016. Disponible sur: <https://www.ademe.fr/avis-lademe-solaire-photovoltaique>
317. Gazbour N. Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques [Internet] [phdthesis]. Université Grenoble Alpes; 2019 [cité 18 mars 2020]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02373608>
318. Stocker TF, Intergovernmental Panel on Climate Change, éditeurs. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.; 2013.
319. De Decker K. How Sustainable is PV solar power? [Internet]. *LOW-TECH MAGAZINE*. 2015 [cité 16 sept 2020]. Disponible sur: <https://www.lowtechmagazine.com/2015/04/how-sustainable-is-pv-solar-power.html>

320. Gazbour N, Razongles G, Monnier E, Joanny M, Charbuillet C, Burgun F, et al. A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*. 2018;197:1607-18.
321. Peters JF. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;16.
322. Cardellini G, Mutel CL, Vial E, Muys B. Temporalis, a generic method and tool for dynamic Life Cycle Assessment. *Science of The Total Environment*. 2018;645:585-95.
323. Ciroth A. ICT for environment in life cycle applications openLCA – A new open source software for life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2007;12:209-10.
324. Mutel C. Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. *The Journal of Open Source Software*. 2017;2:236.
325. Cardellini G, Mutel C. Temporalis: an open source software for dynamic LCA. *Journal of Open Source Software*. 2018;3:612.
326. Ghose A, Hose K, Lissandrini M, Weidema BP. An Open Source Dataset and Ontology for Product Footprinting. In: Hitzler P, Kirrane S, Hartig O, de Boer V, Vidal M-E, Maleshkova M, et al., éditeurs. *The Semantic Web: ESWC 2019 Satellite Events* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2019 [cité 8 avr 2020]. p. 75-9. Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-32327-1_15
327. Brummer V. Community energy – benefits and barriers: A comparative literature review of Community Energy in the UK, Germany and the USA, the benefits it provides for society and the barriers it faces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;94:187-96.
328. Bauwens T, Schraven D, Drewing E, Radtke J, Holstenkamp L, Gotchev B, et al. Conceptualizing community in energy systems: A systematic review of 183 definitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;156:111999.
329. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (Text with EEA relevance.) [Internet]. OJ L juin 5, 2019. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng>
330. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 [Internet]. 2021. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0557>
331. Prigent S. La France planche sur sa définition des communautés énergétiques - Contexte. *Contexte* [Internet]. 2020 [cité 4 mars 2022]; Disponible sur: https://www.contexte.com/article/energie/la-france-planche-sur-sa-definition-des-communautes-energetiques_115604.html

332. Légifrance. Chapitre II : Communautés énergétiques citoyennes [Internet]. Articles L292-1 à L292-3 juill 1, 2021. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGIARTI000043212498/2021-07-01>
333. Légifrance. Chapitre Ier : Communautés d'énergie renouvelable [Internet]. Articles L291-1 à L291-2 janv 1, 2024. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000023983208/LEGISCTA000043212433/2024-01-01
334. Bauwens T, Eyre N. Exploring the links between community-based governance and sustainable energy use: Quantitative evidence from Flanders. *Ecological Economics*. 2017;137:163–172.
335. Luthander R, Widén J, Nilsson D, Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*. 2015;142:80-94.
336. Toulouse E, Sahakian M, Lorek S, Bohnenberger K, Bierwirth A, Leuser L. Energy sufficiency: how can research better help and inform policy-making? 2019 [cité 30 mars 2022]; Disponible sur: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:123016>
337. Sachs W. *Planet Dialectics: Explorations in Environment and Development*. Zed Books Ltd; 1999.
338. Darby S, Fawcett T. Energy sufficiency: an introduction [Internet]. European Council for an Energy Efficient Economy; 2018. Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Tina-Fawcett/publication/329153127_Energy_sufficiency_-_an_introduction_A_concept_paper_for_ECEEE/links/5bf81cdd92851ced67d2708b/Energy-sufficiency-an-introduction-A-concept-paper-for-ECEEE.pdf
339. Erba S, Pagliano L. Combining Sufficiency, Efficiency and Flexibility to Achieve Positive Energy Districts Targets. *Energies*. 2021;14:4697.
340. Ivanova D, Barrett J, Wiedenhofer D, Macura B, Callaghan M, Creutzig F. Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options. *Environ Res Lett*. 2020;15:093001.
341. ADEME. Transition(s) 2050 [Internet]. 2021. Report No.: 011627. Disponible sur: <https://transitions2050.ademe.fr/>
342. RTE. Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 [Internet]. 2021. Disponible sur: <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>
343. Scénario négaWatt 2022 [Internet]. Association négaWatt. [cité 30 mars 2022]. Disponible sur: <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>
344. Luthander R, Lingfors D, Munkhammar J, Widén J. Self-consumption enhancement of residential photovoltaics with battery storage and electric vehicles in communities. Toulon/Hyères, France; 2015. p. 13.

345. Sayegh H, Fraisse G, Leconte A, Wurtz E, Ouvrier Bonaz O, Rouchier S. Determination Of A Short Simulation Sequence For The Multi-Criteria Optimization Of Buildings: A Case Study. Rome, Italy; 2019 [cité 29 sept 2020]. p. 1280-7. Disponible sur: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_210214.pdf
346. Fazlollahi S, Bungener SL, Mandel P, Becker G, Maréchal F. Multi-objectives, multi-period optimization of district energy systems: I. Selection of typical operating periods. *Computers & Chemical Engineering*. 2014;65:54-66.
347. ADEME. INCER ACV - Impacts environnementaux de la filière photovoltaïque & évaluation des incertitudes [Internet]. 2021 [cité 7 oct 2021]. Disponible sur: <http://viewer.webservice-energy.org/incer-acv/app/>
348. ADEME. Site Bilans GES - Électricité - mix moyen - consommation [Internet]. 2018 [cité 11 mars 2022]. Disponible sur: <https://bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element?recherche=Electricit%C3%A9>
349. Salom J, Marszal AJ, Candanedo J, Widén J, Lindberg KB, Sartori I. Analysis Of Load Match and Grid Interaction Indicators in NZEB with High-Resolution Data [Internet]. IEA Solar Heating and Cooling Programme; 2014 mars. Disponible sur: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T40A52--LMGI-in-Net-ZEBs--STA-Technical-Report.pdf>
350. Krebs L, Frischknecht R, Stolz P, Sinha P. Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems, IEA PVPS Task 12 [Internet]. International Energy Agency (IEA); 2020. Report No.: T12-17:2020. Disponible sur: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_PVPS_Task12_LCA_PVandStorage.pdf
351. Hodencq S, Coignard J, TWUM-DUAH NK, NEVES MOSQUINI LH. Including greenhouse gas emissions and behavioural responses for PV self-sufficient optimal design. OIPE 2020 [Internet]. Szczecin, Poland; 2021 [cité 3 juin 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03341890>
352. Hodencq S, Coignard J, Twum-Duah NK, Neves Mosquini LH. Including greenhouse gas emissions and behavioural responses in the optimal design of PV self-sufficient energy communities. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* [Internet]. 2022 [cité 26 mai 2022];ahead-of-print. Disponible sur: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-10-2021-0392>
353. Coignard J, Hodencq S, Twum-Duah NK, Rigo-Mariani R. Is more always better? Assessing the carbon footprint of communities. 2022;TATuP-special topic in issue 2/2022:25-31.
354. Twum-Duah NK, Hodencq S, Amayri M, Ploix S, Wurtz F. Optimal Sizing of Stationary Battery Storage Taking into Account Indirect Flexibility in Tertiary Buildings: Use case of an Electric Vehicle Community. 2022 [cité 6 juill 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03696240>
355. Oniri 2070 - Cie Organic Orchestra [Internet]. 2020 [cité 10 mars 2022]. Disponible sur: <https://organic-orchestra.com/oniri-2070/>
356. Linåker J, Runeson P. Public Sector Platforms going Open: Creating and Growing an Ecosystem with Open Collaborative Development. *Proceedings of the 16th International*

Symposium on Open Collaboration [Internet]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2020 [cité 4 avr 2022]. p. 1–10. Disponible sur: <https://doi.org/10.1145/3412569.3412572>

357. Müller B, Gardumi F, Hülk L. Comprehensive representation of models for energy system analyses: Insights from the Energy Modelling Platform for Europe (EMP-E) 2017. *Energy Strategy Reviews*. 2018;21:82-7.

358. Wurtz F, Delinchant B, Estrabaut L, Pourroy F. 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. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA. Chambéry; 2012.

359. Foster ED, Deardorff A. Open Science Framework (OSF). *Journal of the Medical Library Association*. 2017;105:203-6.

360. JOGL - Just One Giant Lab [Internet]. JOGL - Just One Giant Lab. 2017 [cité 28 janv 2022]. Disponible sur: <https://jogl.io/fr>

361. Allen M, Lamanna G, Espinal X, Graf K, Haarlem M van, Serjeant S, et al. ESCAPE - addressing Open Science challenges [Internet]. 2021 [cité 28 janv 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03372183>

362. Westermann P, Christiaanse T, Beckett W, Kovacs P, Evins R. besos: Building and Energy Simulation, Optimization and Surrogate Modelling. *Journal of Open Source Software*. 2021;6:2677.

363. Niet T, Shivakumar A, Gardumi F, Usher W, Williams E, Howells M. Developing a community of practice around an open source energy modelling tool. *Energy Strategy Reviews*. 2021;35:100650.

364. Leminen S, Westerlund M, Nyström A-G. Living Labs as Open-Innovation Networks. *Technology Innovation Management Review*. 2012;7.

365. Forest F, Carrano T, Hodencq S. Enquête CAUTIC sur le concept COFFEE [Internet]. INNOVACS ; G2Elab; 2021 déc. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03631343>

366. Forest F, Mallein P, Arhippainen L. Paradoxical User Acceptance of Ambient Intelligent Systems. *Proceedings of International Conference on Making Sense of Converging Media - AcademicMindTrek '13* [Internet]. 2013 [cité 10 janv 2022]; Disponible sur: https://www.academia.edu/18553788/Paradoxical_User_Acceptance_of_Ambient_Intelligent_Systems

367. Chambat P. Usages des technologies de l'information et de la communication : évolution des problématiques. *Technologies et Société*. 1994;6:262.

368. Artis A, Ballon J, Blangy S, Dias E, Litvine D. Codéveloppement de projets d'énergie renouvelable : étude de la coopération entre société civile, collectivités et entreprise (codév3) [Internet]. Ademe - Agence de la transition écologique; 2021 juill. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03296413>

369. Gaschnig H, Süsner D, Ceglaz A, Stavrakas V, Giannakidis G, Flamos A, et al. User needs for an energy system modeling platform for the European energy transition. Deliverable 1.2.

- Sustainable Energy Transitions Laboratory (SENTINEL) project. 2020 [cité 11 févr 2022]; Disponible sur: https://publications.iass-potsdam.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_6000590
370. Morrison R. Futures and systems views diagram [Internet]. 2020 [cité 9 févr 2022]. Disponible sur: <https://openmod.discoursehosting.net/uploads/db8804/original/1X/5d22b3f48986be92586fc6d4b3532b82d918c6cc.png>
371. OMEGAlpes Gitlab repository [Internet]. Disponible sur: <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes>
372. Design_Optimization - NoLOAD Gitlab repository [Internet]. GitLab. [cité 12 févr 2022]. Disponible sur: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/design_optimization
373. Boujut J-F, Pourroy F, Marin P, Dai J, Richardot G. Open Source Hardware Communities: Investigating Participation in Design Activities. Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. 2019;1:2307-16.
374. Colaço I. Digital Sufficiency as a Principle for Energy Transition Policies. *Ökologisches Wirtschaften - Fachzeitschrift*. 2021;36:33-5.
375. Nikas A, Lieu J, Sorman A, Gambhir A, Turhan E, Baptista BV, et al. The desirability of transitions in demand: Incorporating behavioural and societal transformations into energy modelling. *Energy Research & Social Science*. 2020;70:101780.
376. ComMod C. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés*. 2005;13:165-8.
377. Bovet A. Eco-SESA - Perspective de suite au programme Eco-SESA : vers un observatoire de la transition énergétique [Internet]. Eco-SESA. 2021 [cité 4 juill 2022]. Disponible sur: <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/eco-sesa-program/news/news/https%3A%2F%2Fecosesa.univ-grenoble-alpes.fr%2Feco-sesa-program%2Fnews%2Fnews%2Fperspective-de-suite-au-programme-eco-sesa-vers-un-observatoire-de-la-transition-energetique-868736.kjsp%3FRH%3D1564152696191>
378. Guattari F, Videoq E, Sparel J-Y. Entretien avec Félix Guattari. *Chimères Revue des schizoanalyses*. 1996;28:19-32.
379. Qu'est-ce que le logiciel libre ? - Projet GNU - Free Software Foundation [Internet]. [cité 6 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html#four-freedoms>
380. The Open Source Definition | Open Source Initiative [Internet]. [cité 6 juin 2022]. Disponible sur: <https://opensource.org/osd>
381. What is open source? | Opensource.com [Internet]. [cité 6 juin 2022]. Disponible sur: <https://opensource.com/resources/what-open-source>
382. Coriat B. La construction de Communs comme alternative à la privatisation des connaissances : promesses et difficultés [Internet]. ANR PROPICE; 2012 [cité 30 juin 2022]. Disponible sur: http://anr-propice.mshparisnord.fr/docus-pdf/commun_genopole_ANR-PROPICE.pdf

383. Schaefer et al. Open letter to the International Energy Agency and its member countries: please remove paywalls from global energy data and add appropriate open licenses [Internet]. 2021 [cité 10 juin 2022]. Disponible sur: <https://forum.openmod.org/t/open-letter-to-iea-and-member-countries-requesting-open-data/2949>
384. Bonneuil C. Introduction. De la République des savants à la démocratie technique : conditions et transformations de l'engagement public des chercheurs. *Natures Sciences Sociétés*. 2006;14:235-8.
385. Cadogan SJ. Curiosity-driven 'Blue Sky' Research: a threatened vital activity? 2014;58.
386. Researchers should reach beyond the science bubble. *Nature*. 2017;542:391-391.
387. Evins R, Orehounig K, Dorer V, Carmeliet J. New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints. *Energy*. 2014;73:387-98.
388. Bollinger LA, Dorer V. The Ehub Modeling Tool: A flexible software package for district energy system optimization. *Energy Procedia*. 2017;122:541-6.
389. Remmen P, Lauster M, Mans M, Fuchs M, Osterhage T, Müller D. TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*. 2018;11:84-98.
390. Jupyter P, Bussonnier M, Forde J, Freeman J, Granger B, Head T, et al. Binder 2.0 - Reproducible, interactive, sharable environments for science at scale. *Proceedings of the 17th Python in Science Conference*. 2018;113-20.
391. Rolon-Mérette D, Ross M, Rolon-Mérette T, Church K. Introduction to Anaconda and Python: Installation and setup. *The Quantitative Methods for Psychology*. 2020;16:S3-11.
392. European Commission. Open Science Policy Platform (OSPP) | Open Science - Research and Innovation [Internet]. 2016 [cité 26 févr 2020]. Disponible sur: <https://ec.europa.eu/research/openscience/index.cfm?pg=open-science-policy-platform>
393. Hodencq S, Debray F, Trophime C, Stutz B, Delinchant B, Wurtz F, et al. Thermohydraulics of High Field Magnets: from microns to urban community scale. 24ème Congrès Français de Mécanique. Brest; 2019.
394. Energy- and exergy-based optimal designs of a low-temperature industrial waste heat recovery system in district heating. *Energy Conversion and Management*. 2020;211:112753.
395. Fitó J, Ramousse J, Hodencq S, Morriet L, Wurtz F, Debizet G. Analyse technico-économique multi-acteurs de la conception d'un système de valorisation de chaleur fatale sur réseau de chaleur. 2020;13.
396. Hodencq S, DELINCHANT B, Frederic W, Artiges N, Ferrari J, Laranjeira T, et al. Towards an energy open science approach at district level: application to Grenoble Presqu'île. *OPEN! proceedings* [Internet]. Grenoble, France; 2020 [cité 1 mars 2021]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03052326>

Table des matières détaillée

Sommaire	2
Remerciements.....	5
Glossaire	6
Abréviations	6
Terminologies	7
Matériels supplémentaires	9
Introduction générale.....	12
Chapitre I Ouverture des connaissances dans le milieu de l'énergie : définitions et enjeux	14
Résumé du chapitre.....	15
I.1. Modélisation énergétique face aux enjeux socio-écologiques.....	16
I.1.1. La place de l'énergie dans la crise socio-écologique.....	16
I.1.2. De nouveaux enjeux pour la conception des systèmes électriques et énergétiques	18
I.1.3. La modélisation énergétique : définition et réponse aux enjeux	20
I.2. De la science ouverte à la modélisation énergétique ouverte	21
I.2.1. Contexte de l'ouverture des connaissances dans la recherche.....	21
I.2.2. Définition et pratiques de la Science Ouverte	22
I.2.2.1. Science Ouverte : définition(s).....	22
I.2.2.2. Composantes de la science ouverte	24
I.2.3. La Science Ouverte réclamée par les institutions.....	25
I.2.4. Une modélisation énergétique ouverte ?	26
I.2.5. Intérêts et freins de la modélisation énergétique ouverte.....	29
I.3. Spécificités de l'ouverture des connaissances dans le domaine de l'énergie.....	31
I.3.1. Enjeux éthiques et historiques de l'ouverture des connaissances dans le milieu de l'énergie	31
I.3.1.1. Pour une recherche transdisciplinaire, intègre et éthique sur l'énergie.	31
I.3.1.2. Historique des pratiques de modélisation énergétique	32
I.3.2. Approches épistémologiques dans le milieu de l'énergie & conséquences sur les objectifs et limites de la modélisation énergétique ouverte.....	35
I.3.3. Les Low-Tech, incarnations alternatives d'ouverture dans le domaine de l'énergie	37
I.3.3.1. Historique des approches techniques alternatives	37

I.3.3.2.	Low-Tech : définition(s) et concepts proches	38
I.3.3.3.	Low-Tech Recherche et Enseignement (LowTRE).....	39
I.3.3.4.	Les Low-Tech comme vecteurs d'ouverture et de collaboration face aux enjeux socio-écologiques.....	40
I.4.	Bilan.....	42
Chapitre II	Les outils et pratiques de modélisation énergétique ouverte	44
	Résumé du chapitre.....	45
II.1.	Comment s'incarne la modélisation énergétique ouverte	46
II.2.	Ouvrir la modélisation énergétique : quoi et comment ?	46
II.2.1.	Déterminer les éléments du processus de modélisation énergétique à ouvrir..	46
II.2.1.1.	Éléments des processus de modélisation énergétique ouverts dans la littérature	46
II.2.1.2.	Choix des éléments à ouvrir.....	47
II.2.1.3.	Idées reçues quant à l'ouvertures de ressources de modélisation énergétique	48
II.2.2.	Comment ouvrir des ressources de modélisation énergétique.....	49
II.2.2.1.	Ouverture juridique : le choix des licences pour les ressources de modélisation énergétique	49
II.2.2.2.	Ouverture technique : mise à disposition et organisation sur le long terme	50
II.3.	Stratégie de développement des outils de modélisation énergétique	52
II.3.1.	Stratégie et niveaux d'ouverture pour le développement des outils.....	52
II.3.2.	Ouverture ou contribution pour les outils de modélisation.....	53
II.3.3.	Caractéristiques des outils de modélisation énergétique	54
II.3.3.1.	Définition et variété des outils de modélisation énergétique.....	54
II.3.3.2.	Phases d'étude des systèmes énergétiques	55
II.3.3.3.	Approches analytiques et de modélisation.....	57
II.3.3.3.a.	Approches de modélisation.....	57
II.3.3.3.b.	Approches analytiques	57
II.3.3.4.	Échelles et résolutions temporelles et spatiales.....	58
II.3.3.4.a.	Échelle géographique	58
II.3.3.4.b.	Horizon et résolution temporels.....	59
II.3.3.5.	Vecteurs énergétiques	59
II.3.3.6.	Utilisabilité et accessibilité aux publics	59

II.3.3.7.	La considération des aspects sociaux.....	61
II.3.3.8.	Modélisation énergétique ouverte à l'échelle du composant ?.....	63
II.3.4.	Développement d'un outil de modélisation énergétique ouverte : l'exemple de OMEGAlpes.....	64
II.3.4.1.	Historique et développement ouvert.....	64
II.3.4.2.	Caractéristiques de OMEGAlpes.....	65
II.3.4.3.	Positionnement par rapport à l'existant.....	68
II.3.4.4.	Retour d'expérience de développement.....	69
II.4.	Reproductibilité des processus de modélisation énergétique ouverte.....	69
II.4.1.	Reproductibilité des processus dans le milieu de l'énergie : cadrage.....	69
II.4.2.	Les notebooks, des objets supports pour l'ouverture et la reproductibilité.....	72
II.4.2.1.	De la programmation lettrée aux notebooks.....	72
II.4.2.2.	Définition et usages des notebooks.....	72
II.4.2.3.	Bonnes pratiques et fonctionnalités des notebooks.....	75
II.4.2.4.	Limites et perspectives pour les notebooks.....	75
II.5.	Bilan.....	78
Chapitre III	La méthode ORUCE (Open and Reproducible Use Case For Energy) - Rendre les pratiques de science ouverte accessibles aux acteurs de l'énergie par le biais des cas d'étude	79
	Résumé du chapitre.....	80
III.1.	Des pratiques aux processus de modélisation énergétiques ouvertes.....	81
III.2.	La méthode ORUCE : ouvrir le processus de modélisation énergétique.....	81
III.2.1.	ORUCE : définition et principes.....	81
III.2.2.	Le processus ORUCE : des données brutes aux résultats.....	82
III.2.3.	Un cas d'application simple de la méthode ORUCE : autoconsommation photovoltaïque d'un foyer.....	83
III.2.3.1.	Informations générales.....	83
III.2.3.2.	Gestion de l'environnement.....	85
III.2.3.3.	Gestion des données.....	86
III.2.3.4.	Présentation du modèle énergétique et modélisation.....	87
III.2.3.5.	Gestion des résultats.....	88
III.2.3.6.	Conclusion du cas d'étude.....	89
III.2.4.	Spécificités de la méthode ORUCE.....	89
III.2.4.1.	Acteurs liés à la méthode ORUCE.....	89

III.2.4.2.	Données archétypales, une entrée pour la méthode ORUCE	90
III.2.4.3.	Le cas d'étude : un objet d'échange intermédiaire et vecteur pérenne de capitalisation	91
III.2.5.	L'objet ORUCE.....	93
III.2.5.1.	Forme et formulation type pour l'objet ORUCE	93
III.2.5.2.	Deux types d'objets ORUCE : recherche et médiation.....	94
III.3.	Discussion et éléments de validation de la méthode ORUCE	96
III.3.1.	Discussion et limites de la méthode ORUCE.....	96
III.3.2.	Éléments de validation : transparence, reproductibilité et accessibilité.....	97
III.4.	Bilan et perspectives.....	102
Chapitre IV	Ouverture et collaboration dans la conception de projets de transition énergétique locaux	104
	Résumé du chapitre.....	105
IV.1.	Thématiques et cas d'études	106
IV.2.	Ouverture d'un processus de modélisation énergétique en phase d'esquisse de conception : projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI	106
IV.2.1.	Chaleur fatale : définition et enjeux	106
IV.2.2.	Le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI : infrastructure de recherche et cas d'étude ouverts	107
IV.2.3.	Application de la méthode ORUCE à un projet de valorisation de chaleur fatale	109
IV.2.4.	Gestion des données pour le projet de valorisation de chaleur fatale LNCMI	111
IV.2.5.	Développement de modèles énergétiques ouverts.....	112
IV.2.6.	Deux formes d'application de la méthode ORUCE au LNCMI.....	113
IV.2.6.1.	Cas d'étude de valorisation de chaleur fatale : un objet de recherche ouvert pour se rapprocher des problématiques du terrain LNCMI	113
IV.2.6.1.a.	Contexte du cas d'étude de recherche LNCMI	113
IV.2.6.1.b.	Scénarios, données et méthode du cas d'étude.....	114
IV.2.6.1.c.	Présentation des modèles énergétiques et de la procédure de planification.....	116
IV.2.6.1.d.	Résultats énergétiques et exergétiques de la replanification	118
IV.2.6.1.e.	Conclusion et discussion	122
IV.2.6.2.	Cas d'étude ORUCE comme objet de médiation auprès du LNCMI.....	124
IV.2.7.	Le LNCMI : une infrastructure de recherche ouverte	125

IV.3. Processus de modélisation énergétique ouvert au service de la recherche et de la médiation auprès des communautés énergétiques : le cas de l’autoconsommation photovoltaïque.....	127
IV.3.1. Autoconsommation photovoltaïque : définition et enjeux.....	127
IV.3.1.1. Généralités sur l’autoconsommation.....	127
IV.3.1.2. Impact environnemental des systèmes d’autoconsommation.....	127
IV.3.1.3. La place des communautés énergétiques.....	128
IV.3.1.4. Sobriété énergétique au sein des communautés.....	128
IV.3.2. ORUCE appliquée à l’autoconsommation photovoltaïque.....	130
IV.3.3. Cas d’étude autour de l’autoconsommation face aux enjeux de transition dans la recherche.....	130
IV.3.3.1. Informations générales.....	130
IV.3.3.2. Gestion des données.....	130
IV.3.3.3. Présentation du modèle énergétique.....	132
IV.3.3.4. Gestion des résultats.....	135
IV.3.3.5. Conclusion et discussion.....	138
IV.3.4. Le cas d’étude ORUCE pour l’autoconsommation : un objet pédagogique	139
IV.3.5. ORUCE comme support de médiation auprès de collectifs citoyens.....	142
IV.3.5.1. Exploration de scénarios pour l’autonomie énergétique d’un système embarqué : le spectacle ONIRI 2070.....	142
IV.3.5.2. Lien aux collectifs citoyens sur la question de l’autoconsommation.....	144
IV.4. Bilan et perspectives.....	146
Chapitre V Une plateforme de modélisation énergétique ouverte et collaborative au service des acteurs de la transition : COFFEE (Collaborative Open Framework For Energy Engineering) 149	
Résumé du chapitre.....	150
V.1. Des connaissances utiles, utilisables et utilisées ?.....	151
V.2. Plateformes collaboratives pour la modélisation énergétique ouverte.....	151
V.2.1. Définition et caractéristiques principales.....	151
V.2.2. Inventaire des plateformes de modélisation énergétique ouvertes.....	152
V.2.3. Historique des travaux de plateforme ouverte au G2Elab.....	157
V.3. COFFEE : Collaborative Open Framework For Energy Engineering.....	158
V.3.1. Le concept COFFEE : une plateforme collaborative et ouverte pour les acteurs de l’énergie 158	
V.3.1.1. Présentation des éléments constitutifs de COFFEE.....	158

V.3.1.2.	Formulaires de contribution dans COFFEE.....	160
V.3.1.3.	Fonctions de socialisation.....	163
V.3.2.	Une enquête centrée sur l’expérience utilisateur pour la conception de COFFEE	164
V.3.2.1.	La méthode d’enquête CAUTIC.....	164
V.3.2.2.	Résultats de l’enquête CAUTIC appliquée à COFFEE.....	166
V.3.2.2.a.	Résultats généraux de l’enquête CAUTIC	166
V.3.2.2.b.	Résultats de l’enquête CAUTIC par profils utilisateurs	166
V.3.2.2.c.	Recommandations pour le développement de COFFEE.....	167
V.3.2.3.	Croisement des résultats d’enquête	169
V.3.2.4.	Discussion des résultats d’enquête	170
V.3.3.	Scénarios d’usage pour l’utilisation de COFFEE	170
V.3.3.1.	Scénarios d’usage par communauté d’acteurs	170
V.3.3.2.	Scénarios d’usage systémique.....	173
V.3.4.	La plateforme COFFEE dans un cadre constructiviste	175
V.3.5.	Du concept à l’implémentation de COFFEE.....	175
V.3.5.1.	Différencier le concept de la solution déployée pour la plateforme COFFEE	175
V.3.5.2.	Premières implémentations de la plateforme COFFEE au G2Elab	176
V.4.	Bilan et perspectives.....	180
Conclusion générale.....		182
Perspectives.....		185
Publications		188
Bibliographie.....		191
Table des matières détaillée		220
Annexes.....		227
Annexe 1	- Corrélation entre action de lutte contre le changement climatique dans le milieu de l’énergie, et ODD.	228
Annexe 2	- Open Source ou Free Software ?	229
Annexe 3	- Modes de partage d’articles en libre accès	229
Annexe 4	- Ouverture des données de l’IEA	230
Annexe 5	- Historique de la responsabilité de la recherche	236
Annexe 6	- Tableau détaillé d’outils de modélisation énergétique.....	237

Annexe 7	- Positionnement de OMEGAlpes par rapport aux autres outils de modélisation énergétique ouverts.....	241
Annexe 8	- Détail concernant les environnements encapsulés.....	242
Annexe 9	- Espace de conception des notebooks, Lau et al.	244
Annexe 10	- Notebook ORUCE autoconsommation PV.....	246
Annexe 11	- Fiche synthétique pour le cas d'étude autoconsommation PV.....	249
Annexe 12	- Template pour ORUCE	250
Annexe 13	- Diagramme ORUCE médiation.....	256
Annexe 14	- Note stratégie open data LNCMI.....	256
Annexe 15	- Tableau récapitulatif des productions avec OMEGAlpes dans le cadre du projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI.....	260
Annexe 16	- Tableau récapitulatif des productions avec OMEGAlpes autour de l'autoconsommation PV	261
Annexe 17	- Détail des résultats associés au point de la courbe de Pareto entre émissions de GES et LCF	262
Annexe 18	- Système énergétique complet du spectacle ONIRI 2070	262
Annexe 19	- Formulaire de contribution dans COFFEE	263
Annexe 20	- Description des niveaux et critères de l'enquête CAUTIC.....	265
Annexe 21	- Résultats détaillés de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE.....	267
Annexe 22	- Scénarios d'usage de COFFEE.....	270
Table des figures	.....	290
Table des tableaux	.....	294
Résumé	.....	296
Abstract	.....	296

Annexes

Annexe 1 - Corrélation entre action de lutte contre le changement climatique dans le milieu de l'énergie, et ODD.

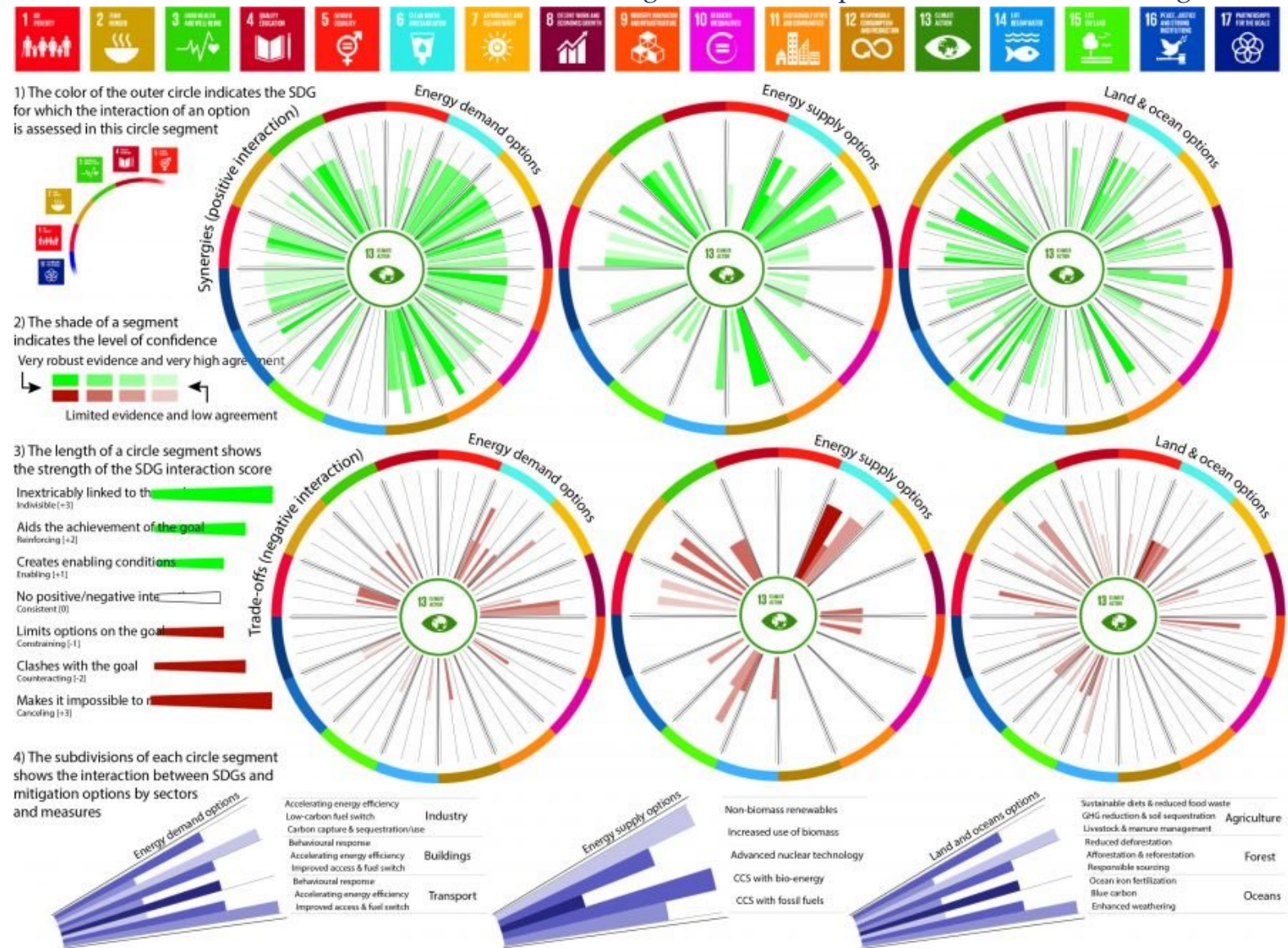


Figure 0.1 : Synergies and trade-offs and gross Sustainable Development Goal (SDG)-interaction with individual mitigation options. Source : figure 5.2 du chapitre 5 du special report de l'IPCC [19], tous droits réservés.

Annexe 2 - Open Source ou Free Software ?

Open Source et logiciel libre sont en fait des principes très proches, nés dans les universités en réaction au mouvement d'appropriation des logiciels des années 1970 [51]. Ils portent toutefois des valeurs différentes :

- La notion de *Free Software* est arrivée en première, avec Richard Stallman dans les années 1980. Elle porte l'idée que les utilisateurs sont libres (*free* au sens de libre) d'utiliser, copier, distribuer et améliorer les logiciels. C'est un mouvement social basé sur la liberté de l'utilisateur [379].
- Le concept d'*Open Source* arrive en 1998, et correspond à des principes de développement de codes sources s'inspirant de ces pratiques. C'est une méthode de développement [380,381].

Si le terme Open-Source désignait initialement une approche spécifique de la création de programme informatique, il peut aujourd'hui qualifier des projets aux principes d'échanges ouverts et transparents, et au développement collaboratif. L'émergence de ces termes va de pair avec l'idée de Communs informationnels, se distinguant des Communs fonciers d'Elinor Ostrom par leur capacité d'addition, c'est-à-dire d'enrichissement des connaissances (voir par exemple les règles de gouvernance d'addition de connaissance sur Wikipédia) [382]. A noter la distinction du mouvement libre avec les Communs par sa vocation d'universalité d'accès et d'usage de la ressource [177].

Annexe 3 - Modes de partage d'articles en libre accès

Le libre accès est un mouvement ayant émergé au début du 21^{ème} siècle, avec un objectif clair : rendre tous les résultats de la recherche disponibles au public sans aucune restriction. Il s'agit, pour quiconque, de pouvoir consulter en ligne les publications de recherche tels que les articles et les livres, gratuitement et sans aucun obstacle technique (comme l'enregistrement obligatoire ou la connexion à des plateformes spécifiques). En plus des droits minimums (lecture, téléchargement impression), des droits supplémentaires tels que le droit de copier, de distribuer, de rechercher, d'établir des liens, d'explorer et d'extraire peuvent également être donnés [61]. Deux voies de partages sont possibles, que l'on qualifie de :

- **Voie verte** (auto-archivage) : mise à disposition par l'auteur ou un représentant de la version finale acceptée pour publication, i.e. après la revue par les pairs mais avant l'édition (à distinguer de la version finale publiée ou *version of record*) dans une archive en ligne. Cette voie peut être mise à mal par des embargos mis en place par les éditeurs empêchant un tel partage de l'article. Mais en France, la loi Couperin de 2016 [73] indique que le dépôt est possible à l'expiration d'un délai, qui est au maximum : de 6 mois pour une publication dans le domaine des sciences, de la technique et de la médecine, et de 12 mois dans celui des sciences humaines et sociales. En Europe la coalitionS réalise des avancées pour ce mode d'archivage avec son planS [81]. On notera que la plupart du temps, la publication de *preprints* (version envoyée par l'auteur avant la revue par les pairs) est permise par les éditeurs.
- **Voie dorée** (publication en accès libre) : modèle commercial le plus courant, consistant en la mise à disposition immédiate par l'éditeur, moyennant des frais pour l'auteur (APC pour *Article Processing Charges*). Lorsque le contenu en libre accès est associé à du contenu nécessitant un abonnement ou un achat, en particulier dans le cadre de revues scientifiques, d'actes de conférences et d'ouvrages édités, on parle de libre accès hybride.

Ressources complémentaires :

- Site de la loi Couperin : <https://scienceouverte.couperin.org/la-loi-numerique/>
- Registre de répertoire en open access : <http://roar.eprints.org/>

- Annuaire des journaux en open access : <https://www.doaj.org/>
- Annuaire des livres en open access : <https://doabooks.org/>

Annexe 4 – Ouverture des données de l’IEA

Le manque d’ouverture des données de l’IEA est assez emblématique des problèmes que peuvent poser des ressources fermées. L’IEA est sans doute une des sources les plus fiables de données énergétiques. De plus, elle dispose de données globales aussi bien sur l’énergie primaire que sur l’énergie finale. Toutefois, ces données sont payantes, et l’alternative à celles-ci disponible publiquement est la base de données de BP (Figure 0.2). Cela pose différents problèmes :

- Les données fiables de l’IEA sont difficilement accessibles et donc mobilisables par la recherche et les publics intéressés. D’autant plus que si les données d’énergie primaire permettent d’avoir une vision de l’existant en termes d’approvisionnement d’énergie, les données d’énergie finale sont primordiales lorsqu’il est question de futurs scénarios énergétiques car faisant état de la demande énergétique actuelle, et donc plus pertinent pour mobiliser les leviers d’efficacité et de sobriété énergétique.
- Les données alternatives sont issues d’un groupe pétrolier privé (BP), ce qui pose des questions quant à leur engagement quant à l’orientation vers des scénarios énergétiques soutenables mobilisant moins d’énergie, notamment fossiles.

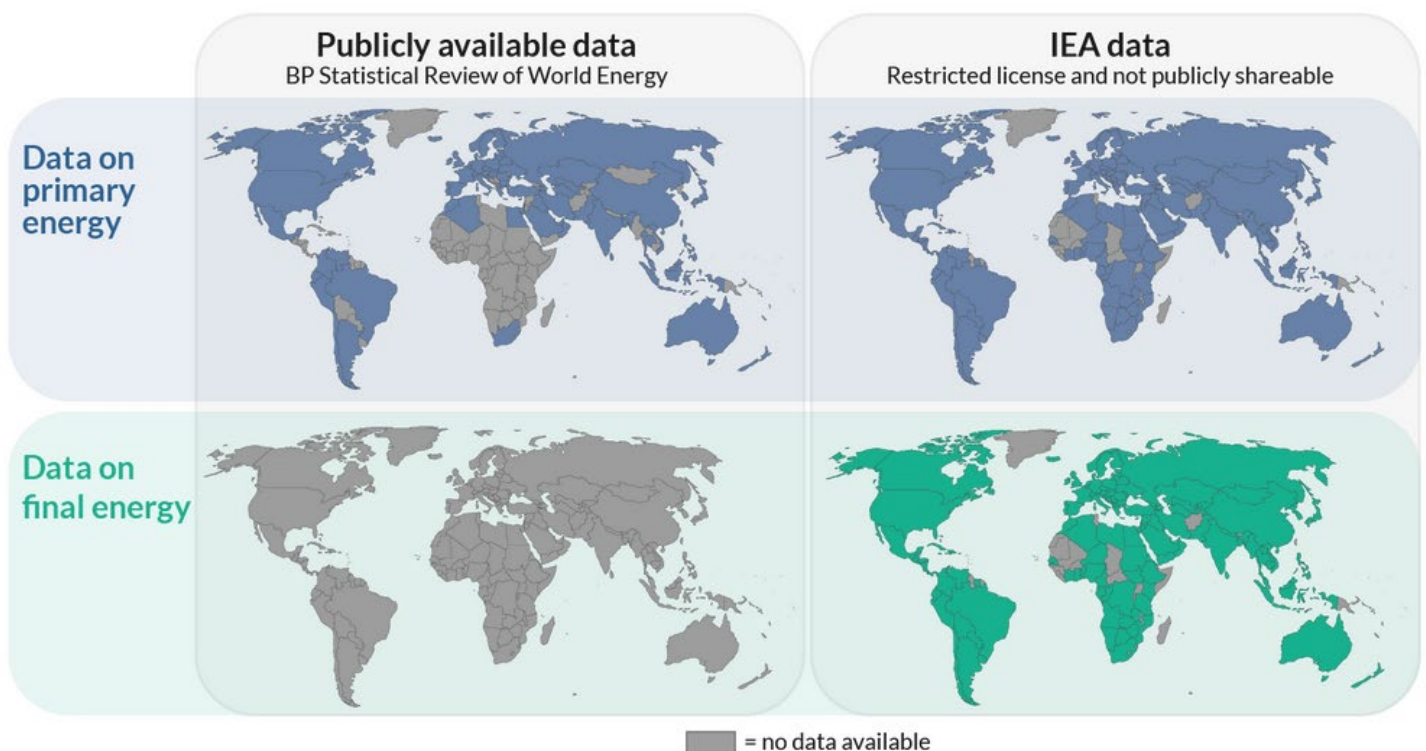


Figure 0.2 : Disponibilité des données énergétiques primaires et finales mondiales. Source : Richie and Roser, [The International Energy Agency publishes the detailed, global energy data we all need, but its funders force it behind paywalls. Let’s ask them to change it.](#) CC-BY 4.0

Le détail des arguments clés pour l’ouverture des données de l’IEA, intégrant des visions économiques et juridiques, est fourni dans une lettre ouverte de la communauté *openmod* à l’IEA [383]. J’ai traduit cette lettre en français en lien avec les auteurs originaux pour qu’elle puisse toucher un public plus large. La version française est donc disponible en ligne [383] et ci-après :

Lettre ouverte à l'Agence Internationale de l'Energie et à ses pays membres : Veuillez retirer les barrières payantes des données énergétiques mondiales et ajouter des licences ouvertes appropriées

Traduit de « [Open letter to the International Energy Agency and its member countries: Please remove paywalls from global energy data and add appropriate open licenses](#) ». Pour contacter l'auteur coordinateur, merci d'envoyer un email à Malte Schäfer : malte.schaefer@gmx.net.

15 Décembre 2021

Dr Fatih Birol
Executive Director
International Energy Agency
Paris, France

Cher Dr Birol, chers membres de l'AIE, chers représentants des pays membres de l'AIE,

Nous, signataires, demandons que **l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)** mette à disposition les ensembles de données qu'elle reçoit et rassemble de ses pays membres sous des licences ouvertes appropriées afin que ces informations puissent être librement utilisées et réutilisées.⁵¹ Un tel statut permettrait aux analystes indépendants des systèmes énergétiques et au public intéressé d'étudier et de mieux comprendre les futurs systèmes énergétiques zéro émission nette. Nous adresserons également cette même demande aux pays membres de l'AIE, aux pays membres associés et aux partenaires stratégiques dans l'espoir qu'ils puissent également influencer les politiques de l'AIE sur cette question particulière.

Dans cette lettre ouverte, nous passons en revue les arguments à l'appui de notre demande, fournissons un certain contexte juridique, présentons notre communauté et concluons par la liste des signataires.

Arguments clefs et solutions proposées

Roser and Ritchie (2021) ont déjà décrit les problèmes découlant du fait que l'AIE fournit ses données derrière des barrières payantes (ou *paywalls*). Ils proposent également une solution simple : mettre les données à la disposition du public et demander aux pays membres d'augmenter leurs contributions financières à l'AIE d'un montant modeste (Roser et Ritchie estiment à 5-6 millions de dollars US par an au total) pour compenser le manque à gagner lié aux licences de données propriétaires. Nous ne présentons donc ici qu'un bref résumé de la situation et de la solution proposée. Pour plus de contexte et de détails, merci de se référer directement à Roser et Ritchie (2021).

Trois décennies de recherche ont montré qu'en tant que société humaine mondiale, **nous devons rapidement passer à des émissions nettes nulles** - et finalement négatives - afin d'éviter les pires conséquences d'un changement climatique. La majorité des émissions anthropiques sont liées à la conversion et à l'utilisation de l'énergie sous une forme ou une autre, notamment par l'utilisation constante de combustibles fossiles. Outre le changement climatique, les processus de conversion énergétique peuvent contribuer de manière importante à d'autres types de dommages environnementaux et humains, notamment la pollution atmosphérique locale.

Des **données de haute qualité** sont nécessaires pour créer des voies de transition efficaces et efficientes vers une société zéro émission nette. Ces voies de transition reposent sur une analyse approfondie et une

⁵¹ Le contenu de ce document est publié sous une licence [Creative Commons CC0 1.0](#) (domaine public). Les noms des signataires ne doivent pas être reproduits séparément de ce document afin de respecter leur vie privée et de conserver le contexte.

modélisation précise des systèmes actuels, notamment des systèmes énergétiques. La qualité de l'analyse et de la modélisation est toutefois déterminée de manière critique par les données utilisées pour décrire et caractériser les systèmes en question.

Des données de haute qualité **existent déjà : elles sont publiées par l'AIE** mais restent derrière des barrières payantes. Et bien que l'AIE soit une institution financée par des fonds publics, les chercheurs et autres tiers intéressés doivent normalement payer et consentir à la non-divulgence pour accéder aux données de l'AIE - alors qu'ils travaillent souvent eux-mêmes pour des institutions publiques, notamment des universités.

En fin de compte, le manque de disponibilité des données conduira à des voies de transition qui seront à la fois **plus coûteuses et moins efficaces** qu'elles n'auraient dû l'être. Il est également fort probable que le montant total des revenus auxquels l'AIE renonce, si elle décide d'arrêter de vendre ses données, n'ait aucun rapport avec le coût global des voies de transition sous optimales. Comme indiqué précédemment, Roser et Ritchie (2021) estiment que les droits de licence de l'AIE rapportent environ 5 à 6 millions USD par an. Les écarts de coûts entre les divers scénarios de transition vers le zéro émission nette seront généralement supérieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux des droits de licence de l'AIE.

Les **avantages des données ouvertes** vont au-delà des efforts d'atténuation du changement climatique. Le McKinsey Global Institute estime que pour les seuls secteurs de l'électricité, du pétrole et du gaz, et des transports, les données ouvertes pourraient créer une valeur économique de 1,3 à 2,0 billions USD par an (Manyika et al. 2013). Les données ouvertes permettent de réduire la duplication des efforts de recherche - moins de ressources étant gaspillées pour recréer les données payantes de l'AIE à partir de sources alternatives et souvent inférieures en qualité. Les données ouvertes réduisent les inégalités, puisque les chercheurs des pays et institutions les plus riches sont mieux placés pour se permettre d'acheter les données de l'AIE. La crédibilité et la reproductibilité de la recherche sont améliorées : des chercheurs indépendants peuvent vérifier ou contester des études basées sur des données communes. La transparence est renforcée en ce qui concerne l'élaboration des politiques publiques. Enfin, les données ouvertes améliorent la sensibilisation et l'engagement en réduisant les obstacles auxquels se heurtent les journalistes et le public pour accéder aux données et comprendre leurs implications. Il est donc dans l'intérêt de toutes et tous que les données de l'AIE soient ouvertes et librement accessibles.

La **solution proposée** est simple et comporte deux aspects : d'une part, l'AIE devrait supprimer les barrières payantes de ses ensembles de données et, d'autre part, ses pays membres devraient augmenter leurs contributions financières à l'AIE pour compenser la perte de revenus provenant des droits de licence sur les données. L'AIE joue un rôle important dans la transition énergétique en cours, il est donc évident que l'organisation a besoin d'un financement adéquat. Deuxièmement, les données libérées doivent ensuite être fournies avec des licences ouvertes appropriées pour permettre leur utilisation et leur réutilisation.

Les signataires demanderont également à leurs gouvernements respectifs d'**augmenter leurs contributions financières** à l'AIE. Les avantages résultant de la disponibilité et de l'ouverture des données, y compris des voies de transition plus rentables, sont très probablement supérieurs à la perte de recettes commerciales par un multiplicateur très important.

En résumé, la mise en libre accès de tous les ensembles de données passés et présents de l'AIE devrait permettre **une transition plus rapide, moins coûteuse et plus équitable** vers des systèmes énergétiques mondiaux zéro émission nette, créer une valeur économique supplémentaire, accroître la qualité et la quantité de la recherche, et améliorer la sensibilisation et l'engagement du public. Le coût de ce résultat est modeste, et nous pensons qu'il pourrait être facilement partagé entre les pays membres de l'AIE.

Comme le dit Hannah Ritchie (2021) dans son commentaire sur Nature : « *Pour s'attaquer aux problèmes mondiaux, le monde doit créer des données ouvertes* ». Nous, les signataires, approuvons sans réserve.

Aspects légaux

Le concept de données ouvertes est souvent mal compris. Nous passons donc en revue certains aspects juridiques dans cette section. Comme pour toute donnée pouvant être rendue publique de manière légitime, les données de l'AIE doivent être assorties d'une **licence ouverte** appropriée.

Nous soutenons le point de vue récent du régulateur Ofgem du Royaume-Uni selon lequel la **licence [Creative Commons CC-BY-4.0](#)** pourrait être la plus appropriée (Ofgem 2021, note de bas de page 7), tandis que les métadonnées devraient être marquées domaine public via une licence [CC0-1.0](#) pour minimiser toute friction associée au traitement en aval (Kreutzer 2011).

L'**Union Européenne** définit ainsi les données ouvertes dans le point 16 de la directive 2019/1024 sur les données ouvertes (Commission européenne 2019) : " Le concept de données ouvertes s'entend généralement comme désignant des données présentées dans un format ouvert qui peuvent être librement utilisées, réutilisées et partagées par tous quelle qu'en soit la finalité." Cette définition exclut clairement les interdictions d'usage commercial.

Nous notons que la clause 1 de l'**accord de la COP26 de la UNFCCC de 2021** (UNFCCC 2021) stipule que l'accord : "Reconnaît l'importance des meilleures données scientifiques disponibles pour une action et une prise de décision efficaces en matière de climat". Cela doit signifier que les principales statistiques énergétiques nationales pertinentes pour l'élaboration des politiques ne doivent pas se trouver derrière des barrières payantes ni être soumises à des contraintes juridiques concernant leur utilisation et leur réutilisation.

Nous notons que le paragraphe 15.2 du **pacte PIDESC de l'ONU de 1966** (Pacte International relatif aux Droits Economiques, Sociaux et Culturels) se lit comme suit : "Les mesures que les Etats parties au présent Pacte prendront en vue d'assurer le plein exercice de ce droit devront comprendre celles qui sont nécessaires pour assurer le maintien, le développement et la diffusion de la science et de la culture. " Cela doit signifier que les pays membres qui fournissent des données à l'AIE ont l'obligation, en vertu du droit international, de fournir également ces mêmes statistiques énergétiques nationales aux analystes des systèmes énergétiques et au public intéressé à des fins de recherche et d'analyse indépendantes sous forme de données ouvertes sous licence appropriée.

Nous tenons à souligner que la situation actuelle est très préjudiciable à nos recherches sur les voies de décarbonisation rapide des systèmes énergétiques nationaux et régionaux et leurs mérites relatifs. Sur ce thème précis, nous aimerions pouvoir **reproduire les résultats présentés dans la feuille de route historique de l'AIE (2021a)** - mais nous en sommes empêchés parce que nous ne pouvons pas nous procurer, utiliser et réutiliser librement les ensembles de données sous-jacents.⁵²

⁵² Dans le cas de l'étude sur le zéro émissions nettes d'ici 2050 (AIE 2021a), les ensembles de données sous-jacents (AIE 2021b) sont, après enregistrement, disponibles sous une licence Creative Commons CC-BY-NC-SA-3.0-IGO. L'utilisation d'une licence publique établie est un progrès évident, mais ce choix de licence particulier est, à notre avis, inadéquat à deux égards. Premièrement, l'attribut non commercial (NC) signifie que la licence ne peut pas être qualifiée d'ouverte selon les définitions établies pour les données ouvertes (par exemple, le considérant le point 16 de la Commission européenne (2019), cité dans son intégralité ailleurs dans ce document). Deuxièmement, seules les licences Creative Commons à partir de la version 4.0 peuvent être utilisées pour les données. Les versions antérieures des licences, telles que la licence CC-BY-NC-SA-3.0-IGO en question, ne renoncent pas aux droits sur les bases de données 96/9/CE permis par le droit de l'Union Européenne et également inclus actuellement dans le droit du Royaume-Uni. L'utilisation de la licence CC-BY-NC-SA-3.0-IGO peut donc signifier qu'un utilisateur pourrait, par inadvertance, porter atteinte à la propriété intellectuelle qui est naturellement attachée aux données qui sous-tendent l'étude de l'AIE sur le scénario zéro émissions pour 2050. Cette éventualité n'est évidemment pas satisfaisante, même si la perspective de litige est faible. En outre, les chercheurs ne peuvent pas légitimement mélanger ces données de l'AIE avec d'autres données sous licence CC-BY-4.0 et rééditer l'agrégat. Cela constitue certainement un obstacle majeur à une

Enfin, en tant que communauté, nous serions **plus qu'heureux d'assurer la liaison** avec l'AIE sur des mesures pratiques pour aider à rendre ces informations importantes librement utilisables et réutilisables (Hirth 2020, Morrison 2018). Nous avons l'expérience de l'interaction avec la Commission Européenne, l'organisme cadre ENTSO-E⁵³, les régulateurs de marché, les opérateurs de marché et diverses entreprises énergétiques dans ce contexte.

Liste des signataires

Nous, les signataires, sommes des **analystes de systèmes énergétiques** et beaucoup d'entre nous sont actifs dans la communauté [Open Energy Modelling Initiative](#) (openmod)⁵⁴. Néanmoins, nous signons ici simplement à titre individuel.

L'Open Energy Modelling Initiative a été créée en septembre 2014 pour promouvoir la modélisation open source et les données véritablement ouvertes. La communauté compte environ **900 membres** abonnés à sa liste de diffusion et 800 dans le forum de discussion. À ce jour, la communauté openmod a organisé 14 ateliers, et notre prochain événement post-Covid est en cours de planification.

Les ressortissants des **18 pays** suivants sont représentés dans la liste des signataires : Albanie, Autriche, Belgique, Canada, Danemark, France, Allemagne, Inde, Irlande, Italie, Pays-Bas, Nouvelle-Zélande, Norvège, Afrique du Sud, Espagne, Suisse, Royaume-Uni et Etats-Unis.

Comme indiqué, certains des signataires transmettront des copies de cette lettre ouverte à **leurs gouvernements respectifs** afin de mettre en évidence le problème dans un contexte national.

Merci de noter que les 37 signataires **ne sont pas listés** dans cette lettre pour des raisons de respect de vie privée.

Références

Commission Européenne (26 Juin 2019). [Directive \(EU\) 2019/1024 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on open data and the re-use of public sector information — PE/28/2019/REV/1](#). *Official Journal of the European Union*. L 172: 56–83.

AIE (Mai 2021a). [Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector](#). Paris, France: *IEA Publications*.

AIE (Mai 2021b). [Net zero by 2050 scenario — Data product](#). *International Energy Agency (IEA)*. Paris, France.

Hirth, Lion (Janvier 2020). [Open data for electricity modeling: legal aspects](#). *Energy Strategy Reviews*. 27: 100433. ISSN [2211-467X](#). doi:[10.1016/j.esr.2019.100433](#). Open access.

Kreutzer, Till (2011). [Validity of the Creative Commons Zero 1.0 universal public domain dedication and its usability for bibliographic metadata from the perspective of German copyright law](#). Berlin, Germany: *Büro für Informationsrechtliche Expertise*.

Manyika, James; Chui, Michael; Groves, Peter; Farrell, Diana; Van Kuiken, Steve; Almasi Doshi, Elizabeth (Octobre 2013). [Open data: Unlocking innovation and performance with liquid information](#). *McKinsey Global Institute*.

recherche efficace sur la réduction des émissions. Néanmoins, nous saluons cette initiative visant à rendre plus accessibles certaines des données détenues par l'AIE.

⁵³ European Network of Transmission System Operators for Electricity, <https://www.entsoe.eu>

⁵⁴ L'Open Energy Modelling Initiative est également définie sur [Wikipedia](#).

Morrison, Robbie (Avril 2018). [Energy system modeling: public transparency, scientific reproducibility, and open development](#). *Energy Strategy Reviews*. **20**: 49–63. ISSN [2211-467X](#). doi:[10.1016/j.esr.2017.12.010](#). Open access.

Ofgem (15 Novembre 2021). [Decision on Data Best Practice Guidance and Digitalisation Strategy and Action Plan Guidance](#). London, United Kingdom: *Office of Gas and Electricity Markets (Ofgem)*.

Roser, Max and Hannah Ritchie (Octobre 2021). [The International Energy Agency publishes the detailed, global energy data we all need, but its funders force it behind paywalls: let's ask them to change it](#). *Our World in Data*. Oxford, United Kingdom.

Ritchie, Hannah (Octobre 2021). [Covid's lessons for climate, sustainability and more from our World in Data](#). *Nature*. **598** (7879): 9–9. ISSN [1476-4687](#). doi:[10.1038/d41586-021-02691-4](#).

Organisation des Nations Unies (Décembre 1966). **International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights (ICESCR)**. New York, USA: United Nations Headquarters. *United Nations General Assembly Resolution* effective January 1976.

UNFCCC (13 Novembre 2021). [Glasgow Climate Pact — COP26 — FCCC/PA/CMA/2021/L.16](#). Rio de Janeiro, Brazil and New York, USA: *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. Cited document notated "Advanced version".

Annexe 5 - Historique de la responsabilité de la recherche

Brève présentation d'un historique de la responsabilité de la recherche, notamment à partir des travaux de Christophe Bonneuil et de la formation à l'éthique de la recherche de l'Université De Lyon [50,384] :⁵⁵

- *Antiquité* – **science désintéressée** et contemplative : attente que les sciences produisent des connaissances fiables sur le monde, indépendamment des applications pratiques. Rejet et dévalorisation d'approches utilitaristes qui attendraient que la science résolve des problèmes particuliers de la société.
- *XVII^{ème} – XVIII^{ème}* : passage d'un régime de curiosité avec des expériences publiques spectaculaires, à celui de l'utilité, avec Francis Bacon en figure de l'utilitarisme.
- *Mi-XVII^{ème} – mi-XVIII^{ème}* : régime de l'**utilité**, développement d'instruments, reproductibilité des expériences.
- *Fin XIX^{ème} – milieu XX^{ème}*, **savant engagé** : le chercheur peut objectiver le débat sans essayer de le guider.
 - o Pour Henri Poincaré (mathématicien français du début du XX^{ème} siècle) : la science est neutre car objective et rationnelle, la science n'est donc pas directement concernée par les questions morales, ce ne sont qu'au niveau des applications et usages que celles-ci se posent.
 - o Pour Robert Merton (philosophe américain du XX^{ème} siècle) : l'institution scientifique oblige les chercheurs à être vertueux, car les chercheurs sont évalués sur leurs travaux seuls, et mettent en commun leurs résultats. On assiste à un scepticisme organisé pour faire avancer la science, de manière désintéressée car il n'y a pas lieu d'enrichissement (principe de communalisme). La science est neutre (principe d'universalisme) et compatible avec la démocratie.
- *1968* - **chercheur responsable** : engagement social et politique des chercheurs, politisation qui rend la parole moins uniforme (abandon de l'objectivité), avec une critique de la linéarité entre science, croissance & progrès, de la technocratie de la part de nombreux auteurs tels que Mumford, Ellul, Marcuse, Habermas, Foucault et Illich.
- *Fin des années 1970 à aujourd'hui* – **lanceur d'alerte / société civile** : baisse de mobilisation, passage à une responsabilité institutionnelle. Deux figures émergentes : celle, rare, du lanceur d'alerte ; et les organisations de société civile qui portent désormais le débat socio-politique sur la technique.
 - o L'idée de science neutre est remise en cause, même si l'objectif de viser la neutralité et l'impartialité de la recherche demeure. On considère que la science est ancrée dans les valeurs contextuelles du monde social : santé, environnement, représentation de soi-même (récit historique, ...) qui orientent les pratiques des chercheurs et les objets de la recherche. Les chercheurs et institutions doivent prendre conscience de cet embarquement éthique.
 - o « Il n'y a pas d'historien objectif, il n'y a que des historiens honnêtes. » Emile Lorca.
 - o Approches utilitariste et désintéressée coexistent.
 - Prise de position de Sir John Cadogan, regrettant que les scientifiques ne puissent plus simplement suivre leur curiosité [385].
 - D'autres considèrent que la science ne peut se cacher derrière son seul rôle de remplir un réservoir de connaissance, elle a désormais un rôle central dans la société qu'elle doit assumer [386].

⁵⁵ Merci à Antoine Bouzin pour l'aide et la relecture.

Annexe 6 - Tableau détaillé d'outils de modélisation énergétique

Nom	Sources	Echelle spatiale	Multi-énergie	Optimisation Simulation	Langage de programmation / Modélisation	Licence	Interface graphique
Artelys Crystal Energy Planner	[122,193,213]	Local - intermédiaire		optim	MILP	commercial	X
Balmorel	[43]	Régional - national	X	optim	GAMS	OS - ISC	
Calliope	[122,130,256]	Quartier à continental	X	optim	Python MILP	Open Apache 2.0	
COMPOSE	[130]				LP		
DER Cam	[122,193,213]	Bâtiment - microgrid	X	optim	GAMS - MILP	free to use	X
dhmin	[43]	Quartier	Chaleur seule	optim	Python	OS GPL 3.0	
DIETER	[43]	Régional - national	elec seule	optim	GAMS	MIT	
Dimosim	[122]	Quartiers - villes		simu	Python	propriétaire, commercial	X
Dispa-SET	[43]	Régional - national	elec seule	optim	GAMS	EUPL 1.1	
Ehub Modeling tool	[122,193,213,387,388]	Local - intermédiaire	X	optim	Matlab, AIMMS, R – MILP, pyehub	Code OS mais Matlab propriétaire / pyehub sans licence	
ELMOD	[43]	Régional - national	elec seule	optim	GAMS	MIT	
EMMA	[43]	Régional - national	elec seule	optim	GAMS	CC BY-SA 3.0	
Energy Plan	[43]	Ville - pays	X	simu	Executable	Freeware	X

Energy Rt	[43]	Régional - national	elec seule?	optim	R & GAMS	AGPL 3.0	
Energy Scope	[195]	Ville - région	X	optim	MILP	OS Apache 2.0	
Ficus	[130,193,213]	Local - intermédiaire	X	optim	MILP	OS GNU-GPL 3.0	
HOMER	[122,193,213]	Local - intermédiaire		simu & optim	Enumerative Optim	propriétaire, commercial	X
Librairies Modelica	[122]	Bâtiment - intermédiaire		simu / optim avec extensions		Openmodelica OS, sinon propriétaire	X
LREM	[130]	Bâtiment - quartier	elec seule		Enumerative Optim		
MATPOWER	[43]	Local	elec seule	optim	Matlab/Octave	3-clause BSD	
MESSAGE	[193]	Global international	X	optim	LP		
minpower	[43]	Quartier	elec seule	optim	Python	MIT	
MODEST (Energy Plan)	[193]	Régional - national		optim	LP	no (?)	
MOST	[43]	Régional - national	elec seule	optim	Python	3-clause BSD	
NEMO	[43]	Régional - national	elec seule	optim	Python	GPL 3.0	
Oemof	[105,122,130,193,213]	Local - intermédiaire	y	optim	Python - LP and MILP	OS GNU-GPL 3.0	
OSeMOSYS	[44,130,193]	Village à continent	y	optim	LP and MILP	OS Apache 2.0	X
pandapower	[43]	Local - intermédiaire	elec seule	optim	Python	BSD	

POLES	[193]	Pays - continent		partial eq			
ProView	[43]	Régional - national	elec seule	simu	Executable	Commercial	
psst	[43]	Régional - national	elec seule	optim	Python	MIT	
PyOnSSET	[43]	Régional - national	elec seule	simu	Python	MIT	
pypower	[43]	Bâtiment - quartier	elec seule	optim	Python	BSD	
pyPSA	[43]	Régional - national	X	optim	Python	GPL 3.0	
Renpass	[43]	Régional - national	X	optim	R & GAMS	GPL 3.0	
Reopt	[122,193,213,219]	Local - intermédiaire		optim	MILP	Proprietary, commercial (free version available)	X
RETSscreen	[43,130]	Bâtiment - ville	elec seule	simu	Executable	Commercial	
rivus	[43]	Quartier - ville	X	optim	Python	GPL 3.0	
Switch	[43]	Régional - national	elec seule	optim	Python	Apache 2.0	
TEASER	[122,389]			simu	Python	Open source MIT	X
TEMOA	[43]	Régional - national	X	optim	Python	GPL 2.0	
TIMES	[193]	Pays - continent			MILP		
TOP-Energy	[130]			simu and optim	Modelica - MILP	commercial	

TRNSYS	[122,130,213]	Quartier	X	simu	Fortran	proprietary, commercial	X
urbs	[43,130]	Régional - national	X	optim	Python - LP	GPL 3.0	

Annexe 7 - Positionnement de OMEGAlpes par rapport aux autres outils de modélisation énergétique ouverts

Function	OMEGAlpes	Function	OMEGAlpes
hourly time steps	x	flexible model foresight	
variable time steps	(x)	rolling horizon	
copperplate approach	x	size as integer/real variable	x
direct current (DC)		pre-defined unit size	
alternating current (AC)		cost based on economy of scale	
power flow (PF)		emission costs	x
optimal PF (OPF)		emissions constraints	x
security-constrained OPF		multi area system	
unit commitment (UC)	(x)	multi-year investment	
security constrained UC (SCUC)	(x)	multi-year operation	
ramp up & down constraints	x	year varying capex & opex (CUR)	
min. up & down time	x	year varying fuel & emission (CUR)	
starts per day/period	x	budget constraints (CUR)	(x)
min. stable load	x	fuel constraints	
must run	x	retirement of existing assets	
startup & shutdown costs	x	fuel switch/dual fuel	(x)
cold & hot startup costs		part load impacts	
economic dispatch (ED)	(x)	ambient temperature impact	
security constrained ED		technology degradation/aging	
non-elec. distribution (constraints)	(x)	generic storage	x
gaseous distribution (constraints)		detailed storage (SOC, DoD)	(x)
liquid distribution (constraints)		component dispatch	x
thermal distribution (constraints)	(x)	1-1 energy conversion	x
district heating/cooling demand	(x)	n-1 energy conversion	x
(drink) water demand		1-m energy conversion	x
hot water demand	(x)	n-m energy conversion	x
steam demand		availability / forced outage	x
other demand		maintenance planning	(x)
simulation (min. total costs)		energy purchase (fixed/variable)	(x)
min. total costs	x	energy sales	(x)
min. investment costs	(x)	deferable demand	(x)
min. operational costs	(x)	generation curtailment	
min. losses	(x)	reserve margin	
max. profit	(x)	primary/secondary reserves	
partial equilibrium	(x)	reliability indicators	
min. customer rates	(x)	risk level (appetite)	
max. efficiency		probability/uncertainty	
min. emissions	x	GIS representation	
demand elasticity		documentation	x
locational marginal price (LMP)		example(s) available	x
perfect model foresight	x	Legend: x: considered; (x): partially considered; empty: not considered	

Tableau 14 : Positionnement de l'outil OMEGAlpes. Source : auteur à partir des critères de Groissböck [43].

Avec cette grille de lecture, OMEGAAlpes obtient la note de 0,80, ce qui le positionne en 14^{ème} position sur 29 outils référencés (ou plus précisément en 12^{ème} place ex-aequo).

Ci-après le positionnement de OMEGAAlpes dans l'article de Heider et al.

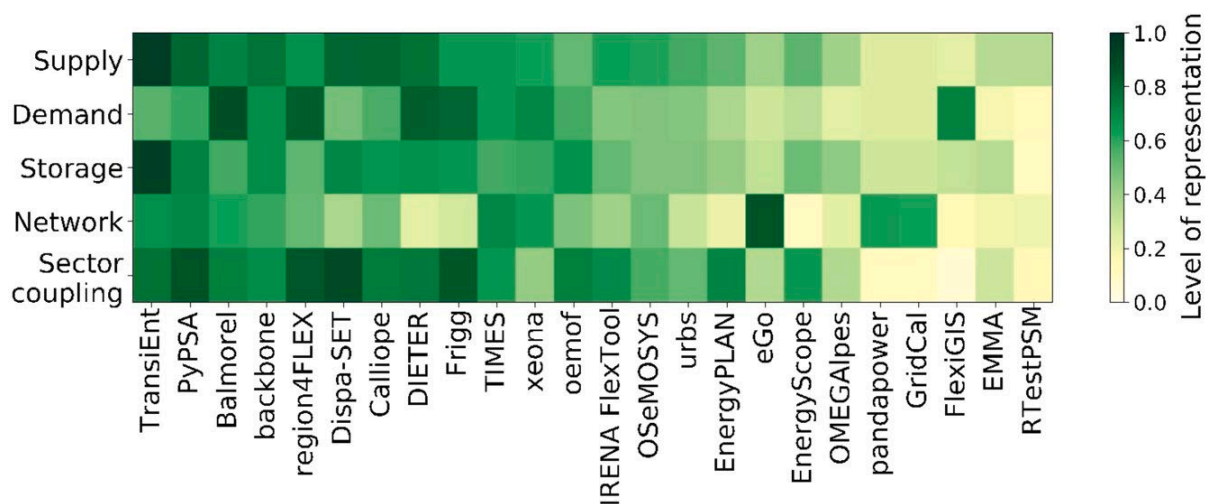


Tableau 15 : Représentation de caractéristiques de flexibilité d’outils de modélisation énergétique ouverts dont OMEGAAlpes. Source : Heider et al. [257], licence CC-BY.

Concernant la procédure CDUR, OMEGAAlpes obtient :

- 3/3 en Citation : identifié sur Software Hertiage et Gitlab, la liste des logiciels associés est fourni et un article de revue exhaustif le décrit.
- 2/3 en Dissémination : l’outil est disponible sous licence ouverte Apache 2.0, un software management plan informel est en place mais devrait être formalisé
- 3/3 en Dissémination : le code a des tests unitaires, exemples, et documentation
- 3/3 en Recherche : l’outil a donné lieu à plusieurs articles et est utilisé dans différentes équipes.

Annexe 8 - Détail concernant les environnements encapsulés

Concernant la mise en place des environnements pour les notebooks, un fichier *requirements* peut être mis à disposition pour renseigner les versions des dépendances avec lesquelles a été développé le notebook. Ce fichier peut différer du *requirements* du répertoire de l’outil de modélisation utilisé qui indique les versions minimales pour l’usage de l’outil : d’une part en indiquant des dépendances supplémentaires si nécessaires, et d’autre part en précisant les versions exactes au moment du développement. Se placer dans ces versions exactes assure une bonne reproductibilité, mais comporte le risque de provoquer des changements de versions dans les environnements des utilisateurs (i.e. leurs différentes dépendances installées localement dans une certaine version, par exemple des *packages* Python). C’est pourquoi la gestion de l’environnement peut être réalisée de deux manières, selon l’usage :

- Un usage en ligne via des applications telles que le service publique Mybinder [390]. Cet usage se fait sur des serveurs distants via Internet, et ne nécessite aucune installation locale.
- Un usage en local, où on installe les dépendances nécessaires au fonctionnement du notebook via le fichier *requirements*.

Concernant ce dernier usage, le risque est de modifier à répétitions les versions locales des utilisateurs. Pour éviter cet écueil et donc faciliter l’usage, des solutions existent et permettent

de se placer dans un environnement « encapsulé » comprenant toutes les dépendances nécessaires, sans modifier l'environnement local. Plusieurs solutions existent pour disposer d'un environnement propre de développement en local :

- Les environnements de calculs archivés, avec les conteneurs dont l'exemple le plus connu est Docker [289]. Ils permettent d'encapsuler tout l'environnement lié à une application et ses dépendances pour un usage pérenne. S'ils sont faciles à utiliser, il est difficile de savoir ce qu'ils contiennent et correspondent à des fichiers assez lourds.
- Les solutions d'environnement de développements intégrés (*IDE* pour *Integrated Development Environment*) permettant de générer des environnements propres à une utilisation. Contrairement aux conteneurs, ils n'embarquent pas toutes les dépendances mais permettent de les installer (via un fichier *requirements* par exemple) dans un environnement vierge. On peut notamment citer Anaconda pour une utilisation des langages Python ou R [391]. Ils sont transparents, modifiables et compacts, mais peuvent être difficiles à construire.

Cet usage en local avec environnement dédié doit être privilégié lors du développement du notebook, car il permet de se placer dans l'environnement exact auquel auront accès les futurs utilisateurs, de notifier toutes les dépendances nécessaires et de faciliter leur installation et donc l'usage du notebook.

Annexe 9 - Espace de conception des notebooks, Lau et al.

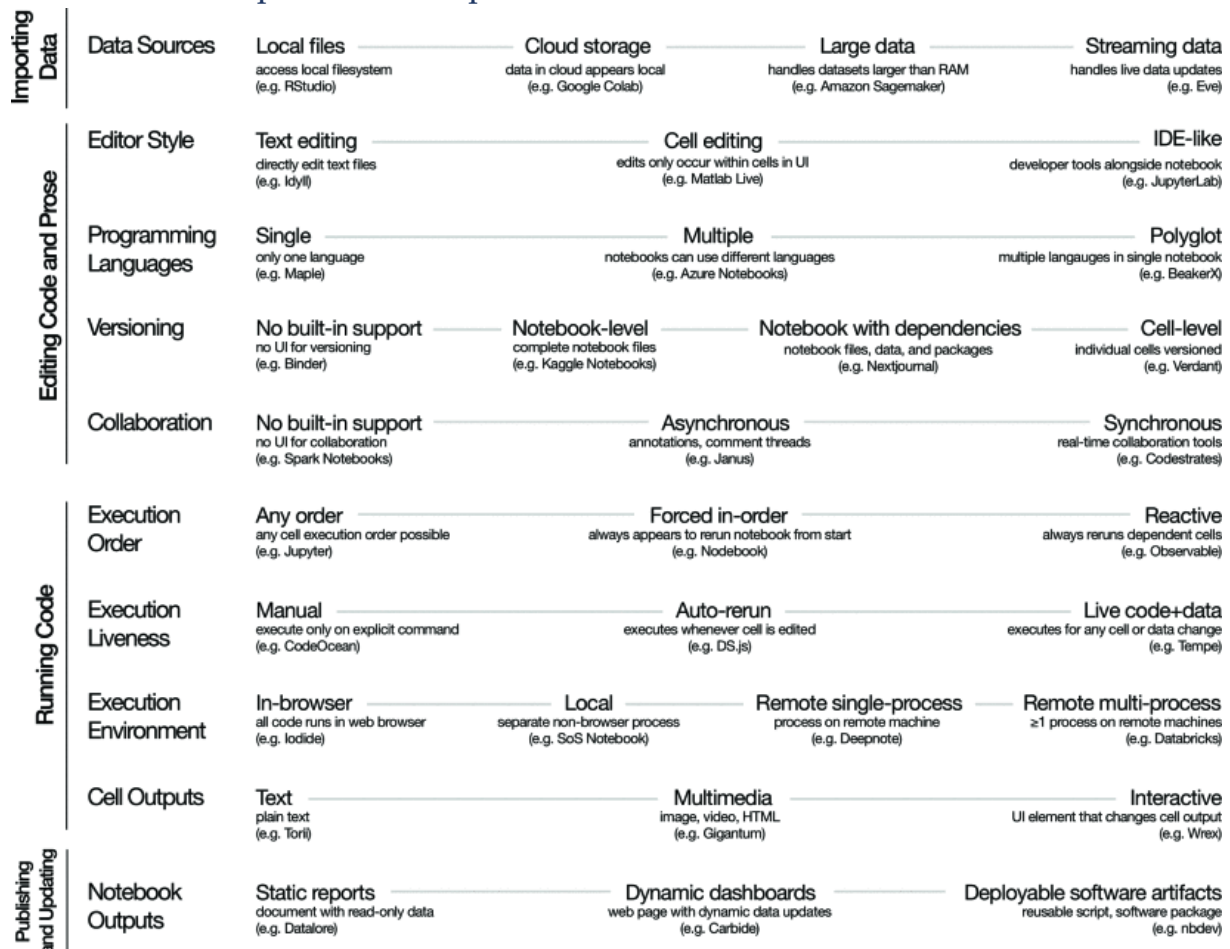


Figure 0.3 : L'espace de conception (design space) des notebooks, formulé après analyse de 60 projets de notebooks dans l'industrie et le milieu académique. Comme le présente le tableau ci-après, chaque projet occupe de multiples points dans chaque dimension de cet espace. Source : Lau et al. [269]. © 2020 IEEE

Annexe 10 - Notebook ORUCE autoconsommation PV

ORUCE autoconsommation PV

Informations générales


- Contexte de l'étude : Ce notebook présente un cas d'étude autour de l'autoconsommation photovoltaïque d'une habitation en phase de pré-étude. L'étude se concentre sur un seul bâtiment représentatif équipé de panneaux PV et d'un stockage par batterie. Il a été développé dans le cadre de travaux de thèse pour présenter la méthode ORUCE (Open and Reproducible Use Case for Energy).
- Licence : Apache 2.0
- Lien mybinder pour une utilisation en ligne 
- Référence : section III.4 de la thèse de Sacha Hodencq.
- Outil : OMEGAlpes, version 0.4.2, licence Apache 2.0
- Lien vers d'autres cas d'étude liés :
 - Voir notamment le cas d'étude dont est inspiré ce notebook, plus détaillé : Open and Reproducible Use Cases in the Energy field for systems design and operation: a dwelling photovoltaic self-consumption example
 - et le notebook lié, développé avec l'outil NoLOAD : Energy systems optimisation models for Life Cycle Assessment : a dwelling photovoltaic system study case using NoLOAD
- Développeur - institution : Sacha Hodencq (sacha.hodencq@g2elab.grenoble-inp.fr) - G2Elab
- Fiche descriptive en fin de notebook

Table des matières

- Informations générales
- Gestion des données
- Présentation de la modélisation énergétique
- Processus de modélisation énergétique
- Gestion des résultats
- Conclusion
- Fiche cas d'étude

Import des packages nécessaires

Un petit guide de gestion de l'environnement selon votre situation.

Code à exécuter si vous êtes sur mybinder (retirez les "#" devant les lignes de code) :

```
In [1]: #####
# import os
# os.system('pip install -r NB_requirements/ORUCE_autoconso_PV_requirements.txt')
#####

In [2]: import pulp

from pulp import lpStatus

import numpy as np
import pandas as pd
from python_scripts.NB_ORUCE_utils import *
from python_scripts.enedis_api import coefficient_des_profils
from omegalpes.general.optimisation.elements import Objective
```

Gestion des données

Profils d'ensoleillement

Les profils d'irradiation et de consommation peuvent être adaptés en fonction de la localisation ou des spécificités des consommateurs. Dans cette étude, nous prenons les profils d'irradiance de Grenoble :

- DHI : Diffuse Horizontal Irradiation (W/m²)
- DNI : Direct Normal Irradiation (W/m²)

Ces données d'irradiation proviennent de la station météo de GrEn-Er (bâtiment de l'école G2Elab et ENSE3), stockés sur le serveur MHI (Monitorat et Habitat Intelligent) dans une base de données influxDB sous une licence Public Domain Dedication and License version v1.0.

Irradiance (basée sur l'OEIMetadata) :

#	Key	Parameter
1	name	irradiance_data.csv
2	title	Données d'irradiance à Grenoble en 2019
3	id	
4	description	Données d'irradiance à Grenoble comprenant le DHI et DNI
5	language	
6	subject	
7	keywords	
8	publicationDate	2020
9	context	
10	spatial	Grenoble, 21 avenue des Martyrs
11	temporal	2019, pas de temps horaire
12	source	http://mhi-srv.g2elab.grenoble-inp.fr/API/
13	licenses	Public Domain Dedication and License version v1.0.
14	contributors	Delinchant B. and Laranjeira T.
15	resources	Delinchant B., Wurtz F., Ploix S., Schanen J.-L. and Marechal Y. (2016). "GrEn-ER Living Lab - A Green Building with Energy Aware Occupants". SmartGreen'16. In proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems. ISBN 978-989-758-184-7, pages 316-323. DOI: 10.5220/0005795303160323

La fonction `extract_csv_from_mhi` peut être utilisée pour récupérer les données du serveur.

```
In [3]: extract_csv_from_mhi(start=datetime(year=2019, month=1, day=1),
end=datetime(year=2020, month=1, day=1))

File irradiance_data.csv generated

Si vous exécutez ce script sur mybinder, vous obtiendrez une Timeout ou Connection error, car cette requête ne peut pas être exécutée. Veuillez utiliser un autre service ou une version locale du Jupyter Notebook. Vous pouvez directement aller à la partie Gestion des données à partir d'un fichier csv, et utiliser les données disponibles sur le serveur gitlab de ce notebook. D'autres requêtes fonctionnant sur mybinder peuvent également être utilisées (fonction get_data, voir la cellule ci-dessous) avec des requêtes http, qui sont autorisées par mybinder. Cependant, ces demandes ne permettent d'accéder aux données du serveur qu'à partir du début de 2021. Si vous n'exécutez pas ce Jupyter Notebook sur mybinder, le serveur de données peut ne pas être accessible.
```

Profils de consommation

Les profils de consommation sont obtenus à partir d'un vecteur temporel de coefficients de consommation électrique provenant d'Enedis : les **profils RES1** c'est-à-dire des coefficients de profils de consommation typiques pour les logements raccordés en basse tension avec une puissance nominale inférieure à 6 kVA. Ces coefficients de profils de consommation sont partagés avec la **licence ouverte v2.0 (Etalab)**. Nous considérons une consommation annuelle de 4586 kWh par an et par logement, calculée à partir du nombre de foyers raccordés au système électrique français selon ce **rapport de la Commission de régulation de l'énergie (CRE)**, page 19 (32,4 millions de consommateurs résidentiels raccordés en 2017), et de la consommation finale d'électricité du secteur résidentiel français de 148,6 TWh en 2019.

L'accès à ces valeurs peut prendre quelques minutes.

Consommation (basée sur l'OEIMetadata) :

#	Key	Parameter
1	name	consumption_data.csv
2	title	Données RES1
3	id	
4	description	Données de profil type de consommation résidentielle en France en 2019
5	language	
6	subject	
7	keywords	
8	publicationDate	2020
9	context	
10	spatial	France, échelle résidentielle
11	temporal	2019, pas de temps horaire
12	source	https://data.enedis.fr/pages/coefficients-des-profils/
13	licenses	licence ouverte v2.0 (Etalab)
14	contributors	Enedis
15	resources	Démarche open data Enedis

```
In [10]: raw_real = coefficient_des_profils(starting_date = datetime(year=2018, month=12, day=31), nb_days = 366)
print(raw_real)

# Removing the two last values that are in 2020:
raw_real.drop(raw_real.tail(2).index, inplace = True)
```

	COEFFICIENT_PREPARE	COEFFICIENT_AJUSTE \
0		
2019-01-01 00:00:00	0.9659	0.942429
2019-01-01 00:30:00	0.8936	0.870277
2019-01-01 01:00:00	0.8237	0.802136
2019-01-01 01:30:00	0.7700	0.745734
2019-01-01 02:00:00	0.7401	0.720413
...
2019-12-31 22:30:00	1.2639	1.276135
2019-12-31 23:00:00	1.0856	1.098298
2019-12-31 23:30:00	0.9485	0.961049
2020-01-01 00:00:00	0.9659	0.975993
2020-01-01 00:30:00	0.8936	0.909149

	COEFFICIENT_DYNAMIQUE
0	
2019-01-01 00:00:00	1.053890
2019-01-01 00:30:00	0.997556
2019-01-01 01:00:00	0.946584
2019-01-01 01:30:00	0.908821
2019-01-01 02:00:00	0.875511
...	...
2019-12-31 22:30:00	1.208828
2019-12-31 23:00:00	1.146505
2019-12-31 23:30:00	1.085694
2020-01-01 00:00:00	1.036566
2020-01-01 00:30:00	0.985428

[17522 rows x 3 columns]

Les coefficients RES1 sont rééchantillonnés pour obtenir des jeux de données horaires. Nous sélectionnons les coefficients les plus finalisés, c'est-à-dire les coefficients dits "COEFFICIENT_DYNAMIQUE". Nous les multiplions ensuite par une consommation horaire moyenne basée sur une consommation annuelle de 4586 kWh comme expliqué précédemment.

```
In [11]: res_i_h = raw_real.resample('H').mean() # Moyenne sur pas de temps 30min
res_i_h.drop('COEFFICIENT_PREPARE', inplace=True, axis=1)
res_i_h.drop('COEFFICIENT_AJUSTE', inplace=True, axis=1)

mean_hourly_consumption = 4586*1e3 / (365*24) # mean hourly consumption in Watts
res_i_h.loc[:, 'COEFFICIENT_DYNAMIQUE'] *= mean_hourly_consumption
consumption_profile = res_i_h

# Renaming headers
consumption_profile.index.names = ['TIMESTAMP']
print(consumption_profile)
```

TIMESTAMP	Consumption
2019-01-01 00:00:00	536.982422
2019-01-01 01:00:00	484.288459
2019-01-01 02:00:00	450.861010
2019-01-01 03:00:00	417.198090
2019-01-01 04:00:00	393.784627
...	...
2019-12-31 19:00:00	915.078918
2019-12-31 20:00:00	842.017212
2019-12-31 21:00:00	741.866516
2019-12-31 22:00:00	652.879041
2019-12-31 23:00:00	584.295898

[8760 rows x 1 columns]

```
In [12]: # Finding potential errors - NaN
consumption_profile[consumption_profile.isnull().any(axis=1)]
```

TIMESTAMP	Consumption
2019-03-31 02:00:00	NaN

```
In [13]: # Replacing missing value with mean hourly consumption
consumption_profile = consumption_profile.replace(np.nan, mean_hourly_consumption)
file_name = "consumption_data"
consumption_profile.to_csv(path_or_buf="/data/" + file_name + ".csv", sep=';')
print("Résultats exportés dans le fichier (1.csv".format(file_name))

Résultats exportés dans le fichier consumption_data.csv
```

Export csv

Fusion des deux dataframes (ensoleillement et consommation) en un fichier csv

```
In [14]: consumption_and_irradiance = hourly_irradiance.copy()
consumption_and_irradiance.insert(0, 'Consumption', consumption_profile.iloc[:,0].values)
print(consumption_and_irradiance)
```

Timestamp	Consumption	DHI	DNI
2019-01-01 00:00:00+00:00	536.982422	0.560000	0.0
2019-01-01 01:00:00+00:00	484.358459	0.571000	0.0
2019-01-01 02:00:00+00:00	450.561310	0.431000	0.0
2019-01-01 03:00:00+00:00	417.198120	0.540000	0.0
2019-01-01 04:00:00+00:00	393.784627	0.559000	0.0
...
2019-12-31 19:00:00+00:00	915.078918	6.009774	0.0
2019-12-31 20:00:00+00:00	842.017212	6.009677	0.0
2019-12-31 21:00:00+00:00	741.866516	6.005161	0.0
2019-12-31 22:00:00+00:00	652.579041	6.008581	0.0
2019-12-31 23:00:00+00:00	584.295898	6.015286	0.0

[8760 rows x 3 columns]

```
In [15]: file_name = "consumption_and_irradiance_data"
consumption_and_irradiance.to_csv(path_or_buf=".data/"+file_name+".csv", sep=',')
print("Résultats exportés dans le fichier "+file_name+".csv")
```

Résultats exportés dans le fichier consumption_and_irradiance_data.csv

Gestion csv

Une version locale des jeux de données est disponible, au cas où la base de données serait indisponible ou mise à jour. Elle est importée avec la fonction read_data, et est utilisée dans la version actuelle du notebook.

```
In [16]: # Chargement des données
yearly_data = read_data(file_name=".data/consumption_and_irradiance_data.csv")
yearly_irradiance = yearly_data[0]
yearly_consumption = yearly_data[1]
print(yearly_data)
print("Consommation annuelle d'un foyer = {} kWh".format(round(sum(yearly_consumption.values[:, 0])/1e3)))
```

Timestamp	DHI	DNI
2019-01-01 00:00:00+00:00	0.560000	0.0
2019-01-01 01:00:00+00:00	0.571000	0.0
2019-01-01 02:00:00+00:00	0.431000	0.0
2019-01-01 03:00:00+00:00	0.540000	0.0
2019-01-01 04:00:00+00:00	0.559000	0.0
...
2019-12-31 19:00:00+00:00	6.009774	0.0
2019-12-31 20:00:00+00:00	6.009677	0.0
2019-12-31 21:00:00+00:00	6.005161	0.0
2019-12-31 22:00:00+00:00	6.008581	0.0
2019-12-31 23:00:00+00:00	6.015286	0.0

[8760 rows x 2 columns], consumption

Timestamp	consumption
2019-01-01 00:00:00+00:00	536.98240
2019-01-01 01:00:00+00:00	484.35846
2019-01-01 02:00:00+00:00	450.56130
2019-01-01 03:00:00+00:00	417.19810
2019-01-01 04:00:00+00:00	393.78464
...	...
2019-12-31 19:00:00+00:00	915.07890
2019-12-31 20:00:00+00:00	842.01720
2019-12-31 21:00:00+00:00	741.86650
2019-12-31 22:00:00+00:00	652.57904
2019-12-31 23:00:00+00:00	584.29590

[8760 rows x 1 columns]

Consommation annuelle d'un foyer = 4450 kWh

Calcul de la puissance PV

La partie suivante permet de choisir les paramètres des panneaux PV. Le système énergétique d'autoconsommation PV est composé de panneaux PV et de batteries au plomb, et est dimensionné de manière à obtenir un compromis entre la couverture PV et un faible impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie : il est basé sur la première partie de l'étude mentionnée en haut de ce notebook. Au final, ce compromis dépend du choix de l'utilisateur. Le dimensionnement suivant est choisi arbitrairement comme dimensionnement du système énergétique : une surface de panneaux PV de 12,2 m² avec une inclinaison de 25,4° et un azimut de 23,8°, mais il peut être modifié.

```
In [17]: # A PV power profile example...
tilt = 25.4
azimuth = 23.8
surface = 12.2
```

```
In [18]: # Using date index in order to determine the sun trajectory
solar = PVSolar(yearly_irradiance.index.to_series())

yearly_DNI = np.array(yearly_irradiance['DNI'])
yearly_DHI = np.array(yearly_irradiance['DHI'])

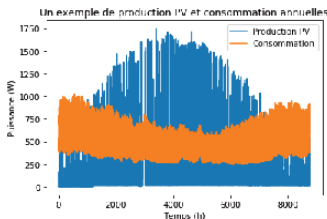
# determining pv power and energy from the given parameters, DNI and DHI:
yearly_pv_power_values = solar.pv_power(tilt, azimuth, surface, yearly_DNI, yearly_DHI)
yearly_pv_power = pd.DataFrame({'pv_power': yearly_pv_power_values, index = yearly_consumption.index})
pv_energy = solar.pv_energy(tilt, azimuth, surface, yearly_DNI, yearly_DHI)

yearly_cons_values = yearly_consumption.values[:, 0]
```

<ipython-input-18-64967140d082>:2: FutureWarning: The default of the 'keep_tz' keyword in DatetimeIndex.to_series will change to True in a future release. You can set 'keep_tz=True' to obtain the future behaviour and silence this warning.

```
In [19]: # plot
fig2, ax2 = plt.subplots()
ax2.plot(yearly_pv_power_values, label='Production PV')
ax2.plot(yearly_cons_values, label='Consommation')
ax2.set_xlabel('Temps (h)')
ax2.set_ylabel('Puissance (W)')
ax2.set_title('Un exemple de production PV et consommation annuelles')
ax2.legend()
print("Consommation annuelle d'un foyer seul = {} kWh".format(round(sum(yearly_cons_values)/1e3)))
print("Production annuelle des panneaux PV pour une inclinaison de {}°, un azimut de {}° et une surface de
```

Consommation annuelle d'un foyer seul = 4450 kWh
Production annuelle des panneaux PV pour une inclinaison de 25,4°, un azimut de 23,8° et une surface de 12,2 m² = 2160 kWh



Présentation de la modélisation énergétique

Description générale

Un modèle énergétique est assemblé avec l'outil OMEGAlpes. Des unités d'énergie telles que des unités de consommation pour les panneaux photovoltaïques ou des unités de stockage pour la batterie sont créées, et reliées par des nœuds d'énergie qui assurent l'équilibre énergétique. Des objectifs sont ensuite ajoutés. Un modèle de problème d'optimisation MILP est alors automatiquement généré et résolu par le package Python PuLP en utilisant le solveur CBC par défaut. D'autres solveurs peuvent être utilisés avec PuLP pour améliorer les performances de résolution.

Schéma du cas d'étude

Cas d'étude autoconso PV OMEGAlpes

Gestion du temps

Avec les solveurs open source tels que CBC, le solveur par défaut utilisé avec PuLP dans OMEGAlpes, il vaut mieux étudier des périodes inférieures à une saison en termes de durée (c'est-à-dire 3 mois). Une saison sera résolue en 5 minutes environ. Les performances seront améliorées avec des solveurs tels que Gurobi ou Cplex. Compte tenu de ces limites, la partie suivante permet de choisir les dates auxquelles l'étude est réalisée en fonction des préférences des utilisateurs.

```
In [20]: start_date = '26/08/2019 00:00'
end_date = '30/08/2019 23:00'
consumption = yearly_consumption.loc[pd.to_datetime(start_date):pd.to_datetime(end_date)]
pv_power = yearly_pv_power.loc[pd.to_datetime(start_date):pd.to_datetime(end_date)]
time = TimeUnit(start=start_date, end = end_date, dt=1)

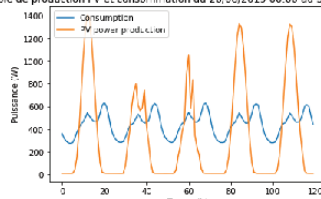
cons_values = consumption.values[:, 0]
pv_power_values = pv_power.values[:, 0]

You are studying the period from 2019-08-26 00:00:00 to 2019-08-30 23:00:00
```

```
In [21]: # plot
fig2, ax2 = plt.subplots()
ax2.plot(cons_values, label='Consumption')
ax2.plot(pv_power_values, label='PV power production')
ax2.set_xlabel('Temps (h)')
ax2.set_ylabel('Puissance (W)')
ax2.set_title('Exemple de production PV et consommation du 00 au 11').format(start_date, end_date)
ax2.legend()
```

Out[21]: <matplotlib.legend.Legend at 0x1d44c88180>

Exemple de production PV et consommation du 26/08/2019 00:00 au 30/08/2019 23:00



Paramètres de stockage

```
In [22]: e_sto = 434
eff_sto_lead_acid = 0.75 # Charging and discharging storage efficiency for the lead acid battery
eff_sto_li_ion = 0.85 # Charging and discharging storage efficiency for the lithium-ion battery
dod_lead_acid = 0.5 # Depth of Discharge for the lead acid battery
dod_li_ion = 0.8 # Depth of Discharge for the lithium-ion battery
self_disch_lead_acid = 0.01 # A default self-discharge of 1% of stored energy losses per hour is considered

caps_bat = e_sto/dod_lead_acid
p_max_bat = caps_bat
```

```
In [23]: # The maximal power values of the grid are chosen based on the maximal consumption and PV production values
max_grid_sizing = (max(max(pv_power_values), max(cons_values)))*2
```

Processus de modélisation énergétique

Instanciation du modèle énergétique

```
In [24]: # ENERGY UNITS
power_grid = ReversibleUnit(time=time, name="power_grid", p_max_cons=max_grid_sizing,
                             p_max_prod=max_grid_sizing,
                             energy_type_prod='Electrical', energy_type_cons=elec)

pv_panels = FixedProductionUnit(time=time, name='PV_panels', p_pv_power_values.tolist(), energy_type=elec)
dwelling_consumption = FixedConsumptionUnit(time=time, name='dwelling_consumption', p_cons_values.tolist(),
                                              energy_type=elec)

battery = StorageUnit(time=time, name='battery', p_max=p_max_bat, p_min=p_max_bat, capacity=caps_bat,
                      e_0=0, soc_max=0, soc_min=dod_lead_acid, eff_ch=eff_sto_lead_acid,
                      eff_d=eff_sto_lead_acid, self_disch=self_disch_lead_acid, energy_type=elec)

elec_node = EnergyNode(time, name="elec_node", energy_type=elec)

Creating the power_grid.prod.
Creating the power_grid.cons.
Creating the power_grid.
Creating the PV_panels.
Creating the dwelling_consumption.
Creating the battery.
Creating the elec_node.
```

Les contraintes sont ajoutées grâce aux paramétrages des objets OMEGAlpes, par exemple avec le l'état de charge maximal de la batterie.

Ajout de la fonction objectif

Pour le choix de ces objectifs, nous pouvons simplement minimiser les imports du réseau, c'est-à-dire la consommation_réseau. Les exports peuvent également être minimisés pour maximiser la couverture de la consommation par l'énergie photovoltaïque locale. Ces deux objectifs sont déjà disponibles dans OMEGAlpes.

Un objectif supplémentaire peut être ajouté afin de minimiser les pertes de stockage, pour que la charge des batteries ait lieu aux moments opportuns. Les pertes de la batterie comprennent l'autodécharge ainsi que les pertes de charge et de décharge :

$$losses_{bat} = \sum_{time} dt * (self - disch * e_{sto}[t] + (P_{dis}[t] + P_{ch}[t]) * (1 - cf_{sto}))$$

avec

- dt le pas de temps (e.g. avec des pas de temps 15 minutes, dt = 1/4)
- e_sto[t] l'énergie stockée à un instant t
- self_disch le taux de décharge de la batterie
- P_ch[t] la puissance de charge à l'instant t
- P_disch[t] la puissance de décharge à l'instant t
- eff_sto l'efficacité de charge et décharge

```
In [25]: # OBJECTIVES
# Already available in OMEGAlpes
power_grid_production_unit.minimise_production()
power_grid_consumption_unit.minimise_consumption()

# Objective developed specifically here
battery.minimise_losses = Objective(exp='lpSum((3)*((0_e_tot)*(1)+
          *((0)_pc[t]*(0)_pd[t])*(1-(2)))'
          ' for t in time.I') format(
          battery_name, self_disch_lead_acid, eff_sto_lead_acid, time.DT,
          name='min_losses', active=True, unit='Wh', parent=None)

# UNITS CONNECTION TO ENERGY NODE
elec_node.connect_units(pv_panels, dwelling_consumption, battery, power_grid_production_unit,
          power_grid_consumption_unit)
```

Résolution

```
In [26]: # MODEL BUILT AND RUN
model = OptimisationModel(time, name="ORUCE")
model.add_nodes(elec_node)

model.solve_and_update()

--- Adding all variables to the model ---
Adding variable : PV_panels_p
Adding variable : PV_panels_e_tot
Adding variable : dwelling_consumption_p
Adding variable : dwelling_consumption_e_tot
Adding variable : battery_p
Adding variable : battery_e_tot
Adding variable : battery_u
Adding variable : battery_capacity
Adding variable : battery_e
Adding variable : battery_pc_max
Adding variable : battery_pd_max
Adding variable : battery_pc
Adding variable : battery_pd
Adding variable : battery_uc
Adding variable : battery_ef
Adding variable : power_grid_prod_p
Adding variable : power_grid_prod_e_tot
Adding variable : power_grid_prod_u
Adding variable : power_grid_cons_p
Adding variable : power_grid_cons_e_tot
Adding variable : power_grid_cons_u

--- Adding all objectives to the model ---
Adding objective : battery_min_losses
Adding objective : power_grid_prod_min_production

--- Adding all constraints to the model ---
Adding constraint : elec_node.power_balance, exp = PV_panels_p[t]-dwelling_consumption_p[t]-battery_p[t]+p
          e_grid_prod_p[t]-power_grid_cons_p[t] == 0 for t in time.I
Adding constraint : PV_panels_calc_e_tot, exp = PV_panels_e_tot == time.DT * lpSum(PV_panels_p[t] for t
          in time.I)
Adding constraint : dwelling_consumption_calc_e_tot, exp = dwelling_consumption_e_tot == time.DT * lpSum(dwe
          lling_consumption_p[t] for t in time.I)
Adding constraint : battery_calc_e_tot, exp = battery_e_tot == time.DT * lpSum(battery_p[t] for t in time.I)
Adding constraint : battery_on_off_max, exp = battery_u[t] <= battery_capacity for t in time.I
Adding constraint : battery_on_off_min, exp = battery_u[t] >= -868.0 for t in time.I
Adding constraint : battery_set_soc_min, exp = battery_e[t] >= 0 * battery_capacity for t in time.I
Adding constraint : battery_set_soc_max, exp = battery_e[t] <= 0.5 * battery_capacity for t in time.I
Adding constraint : battery_calc_e_f, exp = battery_e[t+1] - battery_e[t]*(1-0.01*time.DT) - time.DT * (batter
          y_e[t]*0.75- battery_pd[t]*1/0.75- 0*battery_capacity) == 0 for t in time.I[:-1]
Adding constraint : battery_calc_p, exp = battery_p[t] == battery_pc[t] - battery_pd[t] for t in time.I
Adding constraint : battery_on_off_stor, exp = battery_pc[t] + battery_pd[t] - battery_u[t] * 0.001 >= 0 for
          t in time.I
Adding constraint : battery_def_max_charging, exp = battery_pc[t] - battery_uc[t] * battery_pc_max <= 0 for
          t in time.I
Adding constraint : battery_def_max_discharging, exp = battery_pd[t] - (1 - battery_uc[t]) * battery_pd_max
          0 for t in time.I
Adding constraint : battery_def_min_charging, exp = battery_pc[t] - battery_uc[t] * 1e-05 >= 0 for t in time.I
Adding constraint : battery_def_min_discharging, exp = battery_pd[t] + (battery_uc[t] - battery_u[t]) * 1e-05
          >= 0 for t in time.I
Adding constraint : battery_set_e_0, exp = battery_e[0] == 0
Adding constraint : battery_e_f_min, exp = battery_e_f >= 0 * battery_capacity
Adding constraint : battery_e_f_max, exp = battery_e_f <= 0.5 * battery_capacity
Adding constraint : battery_calc_e_f, exp = battery_e_f[battery_e[119]] == 1*(battery_pc[119]+0.75*battery_pd[1
          19])*1/0.75-0*battery_capacity)
Adding constraint : power_grid_prod_calc_e_tot, exp = power_grid_prod_e_tot == time.DT * lpSum(power_grid_prod
          p[t] for t in time.I)
Adding constraint : power_grid_prod_on_off_max, exp = power_grid_prod_p[t] <= power_grid_prod_u[t] * 2817.5353
          52819563 for t in time.I
Adding constraint : power_grid_prod_on_off_min, exp = power_grid_prod_p[t] >= power_grid_prod_u[t] * 1e-05 for
          t in time.I
Adding constraint : power_grid_cons_calc_e_tot, exp = power_grid_cons_e_tot == time.DT * lpSum(power_grid_cons
          p[t] for t in time.I)
Adding constraint : power_grid_cons_on_off_max, exp = power_grid_cons_p[t] <= power_grid_cons_u[t] * 2817.5353
          52819563 for t in time.I
Adding constraint : power_grid_cons_on_off_min, exp = power_grid_cons_p[t] >= power_grid_cons_u[t] * 1e-05 for
          t in time.I
Adding constraint : power_grid_def_rev, exp = power_grid_prod_p[t] - (1 - power_grid_cons_u[t]) * 2817.5353525
          19563 <= 0 for t in time.I

- - - - - RUN OPTIMIZATION - - - - -
Resolution duration = 0.6171658270721486 seconds.

- - - - - UPDATE RESULTS - - - - -
Updating unit : elec_node
Updating unit : PV_panels
Quantity : p
Quantity : e_tot
Updating unit : dwelling_consumption
Quantity : p
Quantity : e_tot
Updating unit : battery
Quantity : u
Quantity : e_tot
Quantity : capacity
Quantity : e
Quantity : pc_max
Quantity : pd_max
Quantity : pc
Quantity : pd
Quantity : uc
Quantity : ef
Updating unit : power_grid_prod
Quantity : p
Quantity : e_tot
Quantity : u
Updating unit : power_grid_cons
Quantity : p
Quantity : e_tot
Quantity : u
Updating unit : power_grid
```

Gestion des résultats

Affichage et tracé des résultats

Les indicateurs de résultats présentés ici sont la consommation du logement et la production PV en kWh, par rapport à l'énergie du réseau électrique. Nous calculons et affichons également le Load Cover Factor et le Supply Cover Factor, tels que définis par Salom et al., 2014, "Analysis Of Load Match and Grid Interaction Indicators in NZEB with High-Resolution Data". IEA Solar Heating and Cooling Programme. <https://doi.org/10.18777/ieashc-task40-2014-0001>.

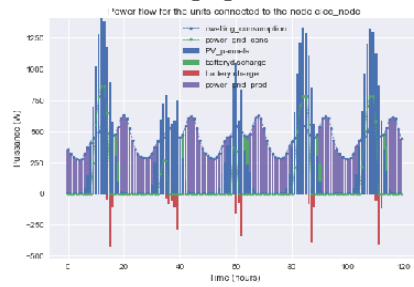
Ils peuvent évidemment être discutés et améliorés en fonction des objectifs de l'étude.

```
In [27]: # Print results
print('Consommation totale du foyer = {} kWh'.format(round(dwelling_consumption_e_tot.get_value()/1000,2)))
# Problème de pourcentage car pertes batteries pour le PV !
print('{}% provenant du réseau'.format(round(power_grid_production_unit_e_tot
          get_value()/dwelling_consumption_e_tot.get_value()*100)
          ))
print('Production PV totale = {} kWh'.format(round(pv_panels_e_tot.get_value()/1000,2)))
# batteries comprise ou consommée par le dwelling?
print('{}% consommée localement'.format(round((pv_panels_e_tot.get_value()-power_grid_consumption_unit_e_tot.g
          et_value())/pv_panels_e_tot.get_value()*100)
          ))
print('Supply Cover Factor: {}'.format(round((pv_panels_e_tot.get_value()-power_grid_consumption_unit_e_tot.g
          et_value())/power_grid_consumption_unit_e_tot.get_value()*100)
          ))
print('Load Cover Factor: {}'.format(round(dwelling_consumption_e_tot.get_value()-power_grid_production_unit_e
          _tot.get_value()/1000,2)))

Consommation totale du foyer = 53.15 kWh
51% provenant du réseau
Production PV totale = 39.04 kWh
69% consommée localement
51% injectée sur le réseau
Supply Cover Factor: 0.69
Load Cover Factor: 0.49
```

```
In [28]: # Plot results
plt = plot_node_energetic_flows(elec_node)
plt.ylabel("Puissance (W)") # changing label from default (kWh) to W
plt.show()

Preparing to plot the energetic flows through the node elec_node.
Add power from PV_panels.
Add power from dwelling_consumption.
Add power from battery.
Add power from power_grid_prod.
Add power from power_grid_cons.
```



Sauvegarde des résultats

Enfin, les flux d'énergie peuvent être sauvegardés sous forme de fichiers csv.

```
In [29]: save_energetic_flows(elec_node, sep=',', file_name='results/ORUCE_PV_results')
```

Interpretation des résultats

Dans ce cas, les résultats concernant la gestion des batteries sont assez triviaux mais ils permettent de voir les flux d'énergie pour la période étudiée. Le modèle OMEGAlpes est accessible pour des études plus approfondies sur ce système énergétique.

Conclusion

Discussion and perspectives

D'autres approches pourraient être envisagées dans cette étude. Une partie de l'appel de puissance pourrait être gérée pour refléter une éventuelle adaptation de la consommation à la production locale. Les travaux futurs pourraient également inclure une gestion des batteries en fonction des émissions dynamiques de GES du réseau électrique en CO2. Il serait également intéressant de réaliser l'étude à l'échelle du quartier afin de qualifier et quantifier les conséquences sur les réseaux d'énergie, d'évaluer la pertinence du dimensionnement avec les indicateurs présentés ici. Une perspective envisagée est d'étendre cette étude de cas à l'échelle des opérations d'autoconsommation collective afin d'intégrer les enjeux de la communauté énergétique. Un point d'intérêt particulier est l'autonomisation des communautés énergétiques locales, avec l'émergence d'une "économie du partage" dans laquelle les ressources ainsi que les biens communs numériques et matériels sont identifiés et utilisés de manière mutualisée (Kostakis et al. 2015 - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.077>).

Disponible en ligne : matériel supplémentaire [C].

(NB : La fiche synthétique de l'Annexe suivante fait également partie du notebook)

Annexe 11 - Fiche synthétique pour le cas d'étude autoconsommation PV

Fiche descriptive

Nom	Autoconsommation photovoltaïque d'un foyer
Description	Cas d'étude d'autoconsommation PV développé comme un scénario type pour l'ouverture du processus de modélisation avec la méthode ORUCE
Objectif	L'objectif sur ce cas d'étude est la gestion optimale des flux de puissance est appliquée à la conception du système énergétique obtenu.
Laboratoire	G2Elab
Contact	Sacha Hodencq - sacha.hodencq@g2elab.grenoble-inp.fr
Lien	à venir
Documents & données associés	S. Hodencq, B. Delinchant, and F. Wurtz, 'Open and Reproducible Use Cases for Energy (ORUCE) methodology in systems design and operation: a dwelling photovoltaic self-consumption example', Bruges, Belgium, Sep. 2021. Accessed: Sep. 16, 2021. Available: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03341883 . Données : ensoleillement Grenoble, données de consommation RES1 Enedis
Outils associés	OMEGAAlpes
Licence	Apache 2.0

Paramètre	Paramétrage proposé	Description (plus exhaustif, langage de vulgarisation nécessaire)
Acteurs	G2Elab (laboratoire de recherche), secondaires : Enedis pour la fourniture de données (gestionnaire de réseau de distribution)	Le cas d'étude est fictif, aussi il y a peu d'interaction entre acteurs.
Terrain	Grenoble, France	
Enjeux	Autoconsommation individuelle	
Secteurs	Electricité	
Analyses	Énergétique	solaire PV, stockage batterie, réseau infini, consommation résidentielle
Hypothèses	Consommation et émissions moyennes estimées	La consommation moyenne d'un logement français est basée sur les profils RES1 Enedis, c'est-à-dire les profils de consommation des logements raccordés en basse tension avec une puissance nominale inférieure à 6 kVA. On considère une consommation annuelle de 4453 kWh par foyer, en appliquant une consommation annuelle de 4586 kWh aux profils RES1. Cette consommation est calculée à partir du nombre de foyers raccordés au réseau selon un rapport de la CRE , page 19 (32,4 millions de consommateurs résidentiels en 2017), et la consommation d'électricité finale du secteur résidentiel de 148,6 TWh en 2019. On considère les émissions de CO2 européennes (source: EEA).
Nature du cas d'étude	Cas applicatif de la méthode ORUCE pour une thèse	
Comment le cas d'étude est établi ?	Optimisation MILP	
Pourquoi le cas d'étude est-il établi?	Aide à la compréhension, Étude de solutions	Aide à la compréhension de la méthode ORUCE et de l'autoconsommation, étude d'un dimensionnement donné pour le système d'autoconsommation.
Finesse modèle / représentation	Modèles macroscopiques de bilans de puissances	

Représentativité / Transposabilité	Cas d'étude type	Données de localités fixes, mais cas d'étude pour un cas d'autoconsommation. Le modèle énergétique ainsi que la prise en compte de LCF et SCF sont proches de travaux de recherche répandus (voir Salom et al. - DOI: 10.18777/ieashc-task40-2014-0001).
Phase d'utilisation	pré-dimensionnement	
Échelle temporelle	Horizon : mois à année / Pas de temps : heure	
Échelle spatiale	bâtiment	
Résultats	Il ne faut pas déduire de conclusions générales du cas d'étude simplifié présenté ici, car beaucoup d'hypothèses sont faites et des valeurs incertaines sont utilisées. L'objectif de l'étude est de souligner l'importance du processus ouvert de modélisation énergétique. L'étude fournit des modèles simples pour adapter l'étude de cas à différentes situations, par exemple en faisant varier les technologies des batteries ou des panneaux photovoltaïques, ou en sélectionnant les données d'entrée en fonction des nouvelles caractéristiques de l'étude et en tenant compte des incertitudes. Elle permet également de comparer différents modèles énergétiques, méthodes de réduction de la période d'étude ou du modèle, et techniques d'optimisation.	
Analyse incertitudes	Aucune analyse d'incertitude n'a été réalisée dans cette étude.	

Annexe 12 - Template pour ORUCE

Lien direct : https://pad.lescommuns.org/ORUCE_fr

tags: ORUCE G2Elab

Template ORUCE

Ce template a été développé comme un modèle pour que les études sur l'énergie soient ouvertes, accessibles et reproductibles, et rendre les pratiques associées facilement applicables pour les modélisateurs et les chercheurs. En d'autres termes, pour qu'ils utilisent un *Open and Reproducible Use Case for Energy* (ORUCE). ORUCE est une méthode qui a été présentée dans l'article "[Open and Reproducible Use Cases for Energy \(ORUCE\) methodology in systems design and operation : a dwelling photovoltaic self-consumption example](#)". ORUCE introduit l'idée que les cas d'utilisation sont de bons vecteurs de reproductibilité, qui peuvent être capitalisés dans des notebooks. Cela peut en faire des objets de collaboration grâce à leur niveau de complexité intermédiaire. Les cahiers peuvent être utilisés pour comprendre et adapter des études, ou pour benchmarker des modèles ou des jeux de données.

Ce modèle ne doit pas être considéré comme absolu mais constitue plutôt une proposition évolutive, dont chacun peut s'inspirer aux différentes étapes d'une étude de modélisation énergétique.

Les parties à remplir sont en *italique*.

Une version en anglais est disponible [ici](#).

Licence : CC-BY 4.0

Nom du notebook

(titre court)

Informations générales

- Contexte de l'étude : *Système énergétique et objectif*

- *Licence* du notebook
- Lien Mybinder afin d'utiliser ce cahier en ligne via le service public Mybinder
- *Référence à un article* (si lié à un article)
- Outil ou méthode de modélisation énergétique utilisé : *nom, version, licence*.
- Lien avec d'autres cas d'étude connexes
- Développeur - institution
- Lien vers une [fiche décrivant le cas d'étude](#), ou [factsheet](#) si elle a été développée.

Table des matières

- [Template ORUCE](#)
 - [Nom du notebook](#)
 - [Informations générales](#)
 - [Gestion des données](#)
 - [Présentation de la modélisation énergétique](#)
 - [Description générale](#)
 - [Schéma du cas d'étude](#)
 - [Hypothèses](#)
 - [Paramètres d'entrée](#)
 - [Processus de modélisation de l'énergie](#)
 - [Instanciation du modèle énergétique](#)
 - [Ajout de contraintes](#)
 - [Ajout de la fonction objectif](#)
 - [Résolution](#)
 - [Gestion des résultats](#)
 - [Affichage et tracé des résultats](#)
 - [Sauvegarde des résultats](#)
 - [Interprétation des résultats](#)
 - [Conclusion](#)
 - [Fiche cas d'étude](#)
- [Annexes](#)
 - [Travailler dans un environnement ...](#)

Import des packages nécessaires

```
import package
```

Gestion des données

- Liste et description des données d'entrée.
On peut utiliser les détails et exemple de l'[OEmetadata key description](#), en remplissant les paramètres qui peuvent l'être. Possibilité de l'ajouter dans la [base de données Open Energy Platform](#).
En voici une version résumée :

#	Key	Description
1	name	Nom de fichier ou nom de table de la base de données
2	title	Titre lisible par l'homme
3	id	Identificateur de ressource uniforme (URI) qui identifie sans ambiguïté la ressource (URL / DOI / ...)
4	description	Résumé de l'information

#	Key	Description
5	language	Langage utilisé dans les structures de données décrites
6	sujet	Référence au sujet de la ressource en termes d'ontologie
7	keywords	Réseau de chaînes de mots-clés pour aider les utilisateurs à rechercher le paquet dans les catalogues
8	publicationDate	Date de publication. Le format de la date est ISO 8601 (YYYY-MM-DD)
9	context	Décrit le cadre général, l'environnement ou le projet
10	contexte spatial	contexte spatial
11	temporel	Période couverte par les données
12	source	Source de l'ensemble de données
13	Licences	La ou les licences sous lesquelles la source est fournie
14	Contributeurs	Les personnes ou organisations qui ont contribué à ce paquet de données
15	ressources	Décrit la ressource de données comme un fichier ou un tableau individuel

Données...

- Chargement (utiliser préférentiellement des chemins relatifs pour l'appel aux données)

```
data = pd.read_csv("source_file.csv")
```

```
data
```
- Inspection (peut être effectuée séparément) : données nulles, valeurs par défaut, ...

```
data[data.isnull().any(axis=1)]
```
- Affichage graphique des données

```
data.plot()
```

Présentation de la modélisation énergétique

Description générale

- Description détaillée du contexte et du système énergétique
- Méthode (linéaire, quadratique, ...) et outil
- Contraintes et fonction objectif

Une fois encore, les [factsheets de l'Open Energy Platform](#) peuvent être utilisées pour décrire l'[outil](#), le [modèle](#) et le [scénario](#).

Schéma du cas d'étude

Il met en évidence les flux d'énergie, les principales contraintes et la fonction objectif du problème d'optimisation. Diverses conventions graphiques peuvent être utilisées (par exemple, celle de [OMEGAAlpes](#)).

Hypothèses

Description des hypothèses principales relatives à des éléments techniques, technologiques, économiques, écologiques et/ou sociaux.

Paramètres d'entrée

- paramètre scalaire tel que la puissance maximale d'une unité de production ou la capacité d'un système de stockage
- liste liée au profil énergétique de consommation ou aux rayonnements solaires mesurés/prévus
Initialiser les paramètres d'entrée pour le système énergétique modélisé

Processus de modélisation de l'énergie

Ce processus dépend de la méthode et de l'outil de modélisation énergétique utilisés.

Instanciation du modèle énergétique

Ajout de contraintes

Ajout de la fonction objectif

Résolution

Gestion des résultats

Description des choix et indicateurs de sortie (en fonction du problème d'optimisation et des objectifs)

Affichage et tracé des résultats

Sauvegarde des résultats

Sous format csv, ...

Interprétation des résultats

Conclusion

- Discussion, perspectives
- Conclusion

Fiche cas d'étude

Une fiche récapitulative est proposée pour décrire les éléments essentiels du cas d'étude à utiliser comme métadonnées.

Nom	Nom du cas d'étude
Description	Brève description de l'histoire, du scénario du cas d'étude, les mécanismes d'interaction des acteurs.
Objectif	Objectif ou problématique du cas d'étude
Laboratoire	Laboratoire(s) ayant travaillé sur ce cas d'étude
Contact	Nom et adresse mail du rédacteur de la fiche
Lien	Lien vers une ressource en ligne du cas d'étude
Documents & données associés	Articles, rapports, présentation, données d'entrée / de sortie

Nom	Nom du cas d'étude	
Outils associés	Outils utilisés dans ce cas d'étude	
Licence	Ouverte (préciser licence), freeware, commerciale	
Paramètre	Paramétrage proposé	Description (plus exhaustif, langage de vulgarisation nécessaire)
Acteurs	Acteur(s) primaires (impliqués), secondaires, type d'acteur	Acteurs concrets : précision pour chaque acteur s'il est acteur primaire (directement impliqué), ou secondaire, ainsi que d'une catégorisation « d'acteur générique » : Laboratoire, acteur électro-intensif, gestionnaire de bâtiment, gestionnaire de réseau énergétique, métropole, consommateur final,
Terrain	Terrain(s) d'étude concret	
Enjeux	Autoconsommation, flexibilité énergétique, sobriété, éco-efficacité, ...	Enjeux/challenges sociétaux
Secteurs	Electricité, chaleur, froid, gaz, transport	
Analyses	Énergétique, économique, environnementale, exergétique, social	Également spécificités comme demande résidentielle, commerciale, industrielle ; éolien, solaire, biomasse, hydrogène, géothermie, hydraulique, batteries, combustion, modèles de réseaux
Hypothèses	Hypothèses principales sur ce cas d'étude	Hypothèses principales sur les données d'entrée, la modélisation énergétique, économique, environnementale, le traitement des données, ...
Nature du cas d'étude	Cas applicatif pour un outil/ une méthode, un support et matériel supplémentaire d'article de recherche, ou objet de médiation ou de pédagogie, ...	
Comment le cas d'étude est établi ?	Méthode inductive ou déductive ; Méthodes de modélisation ; Explicatif / statistique, empirique, ...	Méthode utilisée qui peut être inductive (on part d'un cas particulier pour généraliser) ou déductive (on part d'une loi générale que l'on applique à un cas particulier) ; les méthodes de modélisation utilisées (mathématiques / physiques, e.g. SQP, MILP, ...)
Pourquoi le cas d'étude est-il établi?	Observation, Aide à la compréhension, Aide à la formulation, Recherche/Proposition de solution, Étude de solutions	Cadre d'application, peut-être spécifié en description
Finesse modèle / représentation	Macro ou fin, collectif ou individuel	

Paramètre	Paramétrage proposé	Description (plus exhaustif, langage de vulgarisation nécessaire)
Représentativité / Transposabilité	Spécifique, générique, ...	Facteurs et limites de représentativité : spécifique car [...], générique car [...] Phase d'un projet dans laquelle on s'inscrit. La phase d'analyse d'opportunité comprend la prospective ; la phase de fonctionnement intègre les pilotages anticipatifs et réactifs. Le degré de délégation est qualitatif et doit décrire à qui ou quoi délègue-t-on le fonctionnement, et dans quelles proportions. Il est important de préciser ces phases (conception de quoi ? par exemple).
Phase d'utilisation	Analyse d'opportunités, faisabilité, pré-dimensionnement, conception, fonctionnement, démantèlement	
Échelle temporelle	Horizon : années, jours, heures, secondes / Pas de temps : mois, semaine, jour, heure, minute, seconde, <seconde	
Échelle spatiale	Matériau, composant, unité vie-travail, bâtiment, inter-bâtiments, quartier, réseau urbain, territoire, pays, continent	
Résultats	Principaux résultats du cas d'étude, réponse à la problématique, limites de l'analyse	
Analyse incertitudes	Quantification ou qualification des incertitudes	

Annexes

Travailler dans un environnement ...

- en ligne : utiliser mybinder
 - directement via le lien en haut de notebook
 - ou bien via le site (sélectionner Git repository) sur <https://mybinder.org/>

et utilisez la commande

```
import os
os.system('pip install -r requirements.txt')
```

pour installer les requirements liés au notebook.

- en local : possibilité d'utiliser des solutions de docker, comme Anaconda pour l'utilisation de notebook avec les dépendances adéquates. Pour cela ([source](#)) :
 - *Créer un environnement conda* : [installez Conda](#) et utilisez la commande suivante depuis la fenêtre Anaconda : `conda create --name worklab` puis entrez `activate worklab` afin d'activer l'environnement. NB : vous pouvez avoir accès à la liste des environnements avec la commande `conda env list`.

- *Utiliser un environnement conda dans un jupyter notebook* : `conda install -c anaconda ipykernel puis python -m ipykernel install --user --name=worklab`
- *Avant de lancer le notebook* : assurez-vous d'avoir installé les requirements issus du fichier requirements.txt via la commande `pip install -r requirements.txt`.
- *Lancer le notebook* : `jupyter notebook`. Une fois sur le notebook, pensez à changer le Kernel dans les onglets en haut : *Kernel* → *Change Kernel* → *conda_name*

Annexe 13 – Diagramme ORUCE médiation

Schéma ORUCE médiation reprenant le formalisme de la Figure III.1.

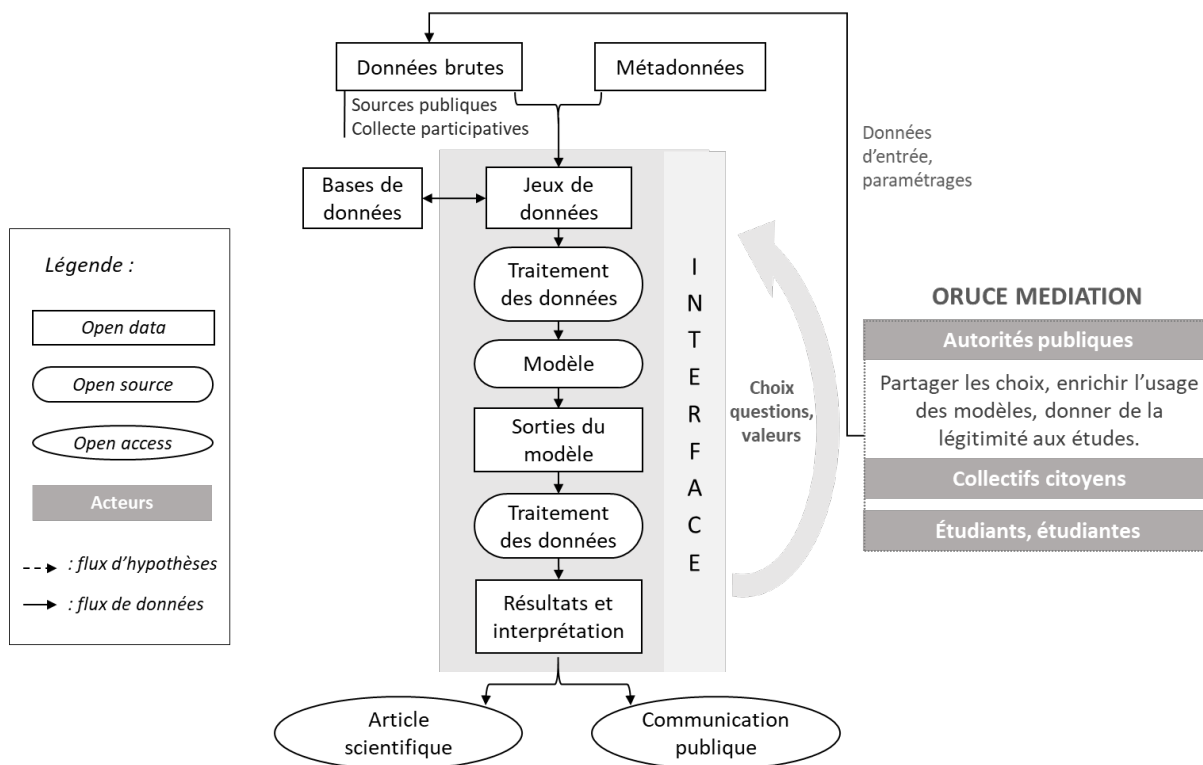


Figure 0.4 : Diagramme de la méthode ORUCE médiation et parties prenantes associées. Source : auteur.

Annexe 14 - Note stratégie open data LNCMI

Sacha Hodencq – Juin 2020

Le LNCMI produit avec son activité de fourniture de champ magnétique intense aux chercheurs du monde entier des résultats expérimentaux, publications bien sûr, mais aussi des données associées à celles-ci. Deux types de données sont toutefois à distinguer pour le LNCMI :

1. Les données expérimentales du LNCMI qui incluent le champ magnétique appliqué, voire les conditions expérimentales comme la température, pression, matériel utilisé, etc.
 → La stratégie de gestion de ces données doit être mûrement réfléchi en accord avec les chercheurs et la direction du LNCMI, mais aussi du CNRS, de l'UGA et de l'EMFL. Concrètement, un service d'hébergement des données avec DOI harmonisé

avec l'EMFL est en cours de déploiement, notamment avec le projet ISABEL qui débutera en Novembre 2020.

2. Les données énergétiques du LNCMI qui n'incluent que les points de consommation du LNCMI en terme de puissance électrique. Pour ces données énergétiques, on peut également faire une distinction entre :
 - a. Les données temps réel de consommation telles que relevées par RTE : ces données sont actuellement utilisées dans le projet de service réseau auprès de l'agrégateur Energy Pool, mais aussi dans des projets d'enseignement avec la mise à disposition des points de puissance LNCMI au bâtiment voisin GreENER pour l'école d'ingénieur ENSE3 du groupe Grenoble INP.
 - b. Les données « année modèle » de consommation électrique du LNCMI, reconstruite à partir de données de consommation réelles de différentes années pour aboutir à une courbe représentative d'une année de fonctionnement « classique ». Ces données sont principalement utilisées pour le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI, avec un groupe projet multi-acteur de la recherche (G2Elab, PACTE, LOCIE, Eco-SESA, Récuperte) et acteurs locaux de l'énergie (Grenoble Alpes Métropole et CCIAG).
- Ces données sont pressenties comme non-sensibles, partageables en open data puisque celles-ci ne donnent pas directement accès au profil de champ magnétique ou autres informations expérimentales, et pour 2.b. elles sont reconstruites à partir de différentes années.

En outre, ces profils ont été utilisés pour des études liés à la valorisation de chaleur fatale ou la flexibilité électrique, associés à des outils d'optimisation énergétiques open source du G2Elab (OMEGAAlpes), formant ainsi des modèles et scénarios énergétiques. L'ambition est de travailler en open science, donc avec des modèles intégrant :

- du code ouvert : modèles pour le projet de valorisation de chaleur fatale LNCMI développés avec OMEGAAlpes, fournis avec une licence ouverte Apache 2.0..
- des données ouvertes, qui nécessitent une licence.

Différents types de licences de données ouvertes sont possibles :

- les licences très permissives de type Creative Commons 0 (CC0-1.0) ou Open Data Commons Public Domain Dedication and License (PDDL) qui mettent les données dans le domaine publique,
- les licences qui permettent le partage des données, la création de travaux à partir de celles-ci et la modification tant que l'*Attribution* est respectée, c'est-à-dire que toute utilisation des données telles que présentées plus tôt doit attribuer l'origine des données à son propriétaire, et faire clairement mention de la base de données initiale et licence associée. On peut par exemple citer les licences [Open Data Commons Attribution License \(ODC-BY 1.0\) v1.0](#) ou [Creative Commons 4.0 BY \(CC BY 4.0\)](#).
- Licences dites « copyleft » qui de la même manière permettent le partage des données, la création de travaux à partir de celles-ci et la modification tant que l'*Attribution*, mais aussi le *Share-Alike* et le *Keep open* sont respectés, c'est-à-dire que toute version adaptés des données doit être partagée avec la même licence, et accessible de manière ouverte. On peut citer les licences [ODC Open Database License \(ODbL 1.0\)](#) ou [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International \(CC BY-SA 4.0\)](#)

NB : les licences ODC sont spécifiques aux jeux de données là où les licences Creative Commons sont plus génériques et applicables sur tout type de contenu.

Suite à différentes discussions avec les équipes projets, la licence ODC-BY 1.0 nous semble la plus adaptée pour les données énergétiques du LNCMI. En suivant [ce lien](#) vous pouvez accéder à un exemple de licence pour les données LNCMI (ici appliqué sur une semaine de données énergétique identifiée comme non-sensible).

Pour ce qui est de l'intérêt de partager ses données énergétiques de manière ouverte, cela permet :

1. un vrai partage de connaissances avec la communauté scientifique, notamment dans le milieu de la modélisation énergétique (voir la communauté [openmod](#) par exemple). Cela permet, par la transparence et le peer-reviewing, d'éviter les erreurs voire la fraude ou les biais de modèles, de réduire les efforts parallèles, et de donner de la crédibilité aux études et arguments scientifiques [84].
2. des modèles & données ouvertes pour échanger avec les autorités locales qu'elles soient institutionnelles (CNRS) ou politiques (Grenoble Alpes Métropole) [36]
3. de rendre ces modèles accessibles pour une meilleure collaborations entre les parties prenantes [43] et participation [98], mais aussi accessibles à des collectifs citoyens ou institutions qui n'ont pas forcément les fonds pour disposer de solutions commerciales. La science ouverte est par ailleurs particulièrement adaptée pour les enseignements [100].
4. d'être en accord avec les recommandations voire exigences des autorités publiques comme récemment en France avec la Loi pour une République Numérique [73] et en Europe via la création de l'*Open Science Policy Platform* exigeant l'accès ouvert pour les projets H2020 [77,392].

Quelques liens utiles :

- Sur la partie légale et les recommandations de l'Europe qui est discutée sur ce thread : <https://forum.openmod-initiative.org/t/re-use-of-public-sector-information/476>
- <https://opendatacommons.org/guide/>
- https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Choosing_a_license#Data

Bibliographie :

Bazilian, Morgan, Andrew Rice, Juliana Rotich, Mark Howells, Joseph DeCarolis, Stuart Macmillan, Cameron Brooks, Florian Bauer, and Michael Liebreich. 2012. 'Open Source Software and Crowdsourcing for Energy Analysis'. Energy Policy, Special Section: Fuel Poverty Comes of Age: Commemorating 21 Years of Research and Policy, 49 (October): 149–53. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.032>.

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>.

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.

Groissböck, Markus. 2019. 'Are Open Source Energy System Optimization Tools Mature Enough for Serious Use?' *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102 (March): 234–48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.020>.

LOI N° 2016-1321 Du 7 Octobre 2016 Pour Une République Numérique. 2016. 2016-1321.

Morrison, Robbie. 2018. 'Energy System Modeling: Public Transparency, Scientific Reproducibility, and Open Development'. *Energy Strategy Reviews* 20 (April): 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.010>.

— — —. 2019. 'An Online Community for Open Energy Analysis'. Presented at the EMP-E 2019 meeting, Brussels, Belgium.

Pfenninger, Stefan, Joseph DeCarolis, Lion Hirth, Sylvain Quoilin, and Iain Staffell. 2017. 'The Importance of Open Data and Software: Is Energy Research Lagging Behind?' *Energy Policy* 101 (February): 211–15. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.046>.

Annexe 15 - Tableau récapitulatif des productions avec OMEGAlpes
dans le cadre du projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI

Use Case	Article Reference	Source Code ¹	Notebook ²	Actors	Space and Time	Functionalities Development	Research Objective
Waste heat recovery	[307] EN	UCE1	NB1	LNMCI CCIAG	District scale Year study Hourly time steps	Prototype of OMEGAlpes Energy package— differentiation of energy vectors	Development of energy planning decisions for an electro-intensive consumer, subject to economic, social, and environmental constraints and objectives
	[308] EN			LNMCI CCIAG	District scale 6 months study Hourly time steps	Shiftable energy unit	Methodology of data-driven modelling of an existing load profile in order to build archetypes
	[193] EN			LNMCI CCIAG	District scale Two weeks study 10 min time step	Heat pump class Thermal Modelling of buildings	Evaluation of energy flexibility for building heating
	[393] FR			LNMCI CCIAG	District scale One year study	-	Technical, economic, and environmental consequences of the evolution of research infrastructure, from component to district scale
	[253] EN			LNMCI CCIAG	District scale One year study Hourly time step	Exergy module	4E (energy, exergy, economy, and exergo-economy) methodology description and evaluation
	[394] EN			LNMCI CCIAG	District scale One year study Hourly time step	Exergy module	Evaluation of different technical criteria and their possible impact on the design of a waste heat recovery system
	[255] EN			LNMCI CCIAG	District scale One year study Weekly resolution	Exergy module, energy planning modification	Evaluation of flexibility and temperature management strategies to improve waste heat recovery energy- and exergy-wise
	[395] FR			LNMCI CCIAG	District scale One year study 7 weeks planning	Exergy module, actor package	Multi-objective optimisation for the design of a waste heat recovery system by means of multi-actor technical and economic analysis
	[310] FR			LNMCI CCIAG	District scale 2 weeks horizon, hourly resolution	Open science considerations— LNCMI notebook	Describing and discussing open and collaborative platforms
	[396] EN			LNMCI CCIAG	-	Open energy modelling process	Presenting a transferable workflow to make open energy modelling principles and advantages accessible

¹ UCE1: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/tree/master/various_examples/LNCMI_cases

² NB1: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_notebooks/-/blob/master/notebooks/LNCMI.ipynb

Tableau 17 : Catalogues de cas d'études OMEGAlpes pour la chaleur fatale avec référence d'article, langue, code, notebooks, échelles temporelle et spatiale, développements, and objectif de recherche. Source : auteur [188]

Annexe 16 - Tableau récapitulatif des productions avec OMEGAlpes
autour de l'autoconsommation PV

Use Case	Article Reference	Source Code ¹	Notebook ²	Actors	Space and Time	Functionalities Development	Research Objective
Energy self-consumption	[213] EN	UCE2	NB2	Producer Consumer Supplier Prosumer	Building scale One day study 5 min time-step	Energy and actor package	First presentation of OMEGAlpes with a simple self-consumption example
	[235] [EN]	UCE3	NB3	Prosumer Supplier	Building scale One day study Half-hourly time step	Actor package	Offering a method to help stakeholders to formalise their constraints and objectives and to negotiate in the design process
	FR	UCE4	NB4	Prosumer Consumer	Building scale One day study Half-hourly time step	Actor, Ipfigs	Development of a conflicting constraint identification algorithm for optimisation problems
	[282] EN	-	NB5		Building scale 4 days study Hourly time step	Open science consideration	Offering an open and reproducible use case of PV self-consumption, taking into account energy and environmental indicators

¹ UCE2: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/blob/master/article_case_study/article_2019_BS_PV_self_consumption/article_2019_BS_PV_self_consumption.py ; UCE3: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/blob/master/article_case_study/article_2019_BS_multi_actor_modelling/article_2019_BS_multi_actor_modelling.py UCE4: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/blob/master/article_case_study/article_2020_IBPSA_constraints_identification/article_2020_IBPSA_constraints_identification.py

² NB2: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/blob/master/notebooks/article_2019_BS_PV_self_consumption.ipynb ; NB3: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/blob/master/notebooks/article_2019_BS_multi_actor_modelling.ipynb ; NB4: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_notebooks/-/blob/master/notebooks/article_2020_IBPSA_constraint_identification.ipynb ; NB5: https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/blob/master/notebooks/article_2021_BS_ORUCE.ipynb

Tableau 18 : Catalogues de cas d'études OMEGAlpes pour l'autoconsommation PV avec référence d'article, langue, code, notebooks, échelles temporelle et spatiale, développements, and objectif de recherche. Source : auteur [188]

Annexe 17 - Détail des résultats associés au point de la courbe de Pareto entre émissions de GES et LCF

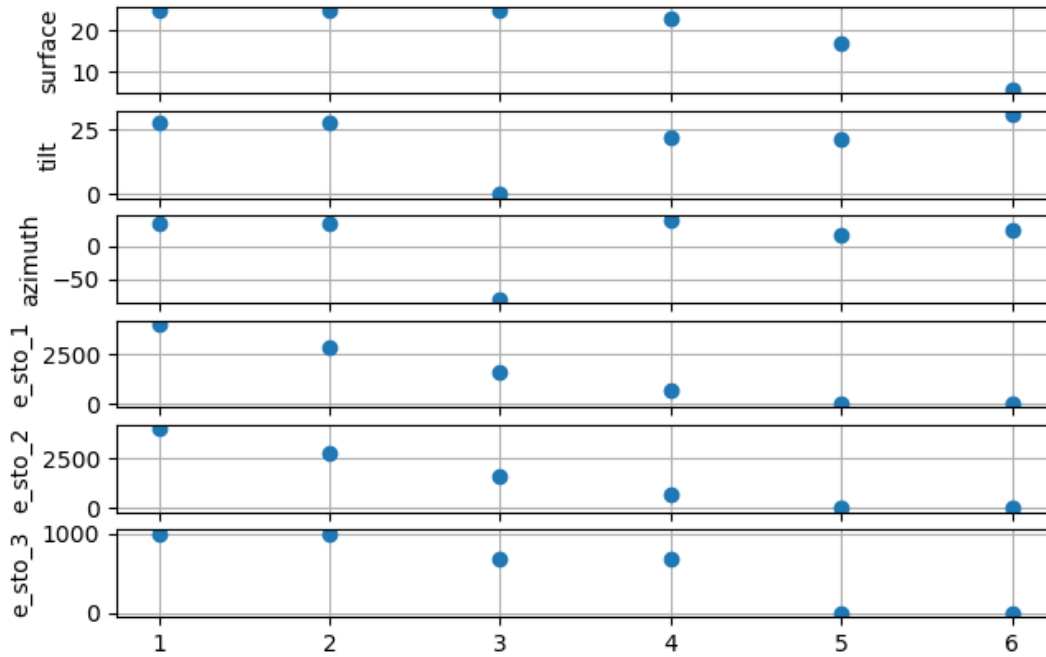


Figure 0.5 : Détail des résultats d'optimisation de la courbe de Pareto entre émissions de GES et LCF, comprenant pour les chaque optimisation la surface PV, l'inclinaison, l'azimut, et l'énergie stockée pour les 3 jours types (4 janvier, 29 août, 27 novembre). Source : auteur.

Annexe 18 - Système énergétique complet du spectacle ONIRI 2070

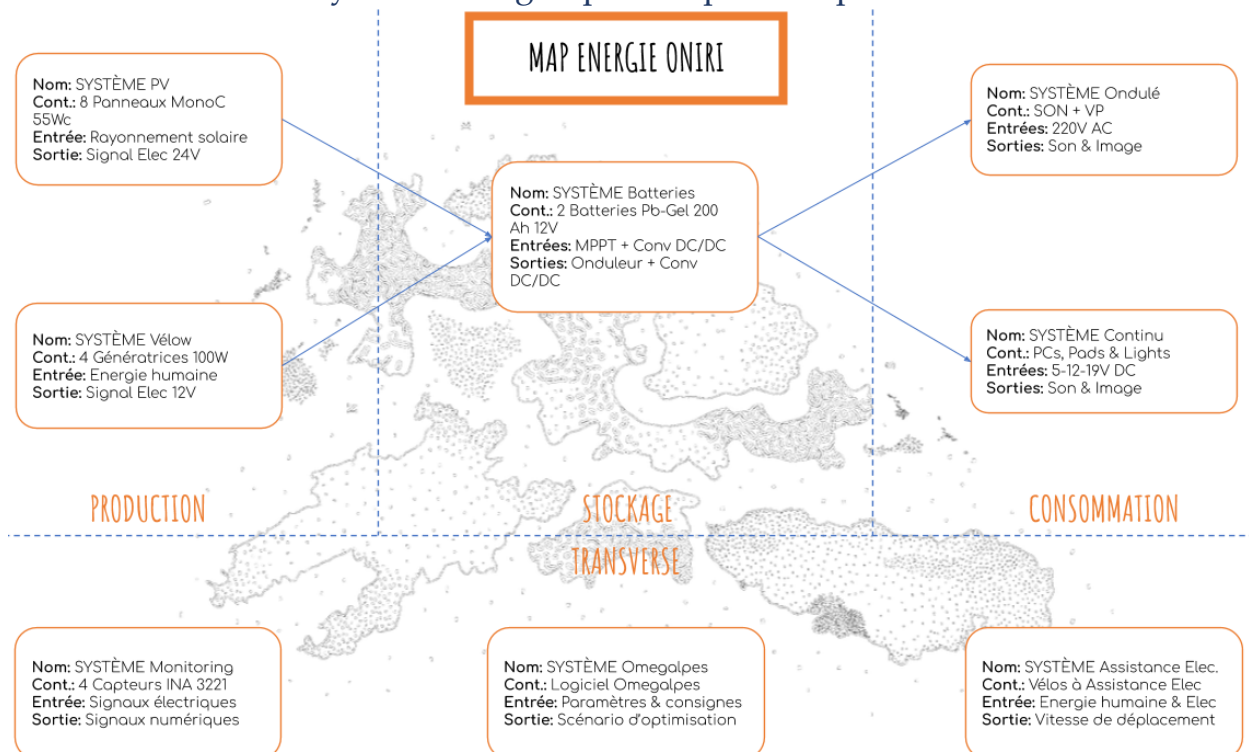


Figure 0.6 : Système énergétique complet du spectacle ONIRI 2070. Source : Kévin Loeslé, Organic Orchestra, Licence CC-BY-SA

Annexe 19 - Formulaire de contribution dans COFFEE

Les travaux de l'Open Energy Platform ou de l'Energy Modelling Platform for Europe évoqués dans le chapitre 5 ne sont pas toujours adaptés pour des outils et modèles qui s'éloignent de la planification énergétique, tels que NoLOAD qui est plutôt un outil de conception de composants et systèmes. Ainsi les formulaires de COFFEE sont basés sur les résultats d'un cycle d'atelier du programme de recherche interdisciplinaire Eco-SESA, où l'objectif était de fournir des fiches descriptives de méthodes et outils d'une part, de situations d'autre part, et enfin de cas d'usage, soit le croisement d'un outil et d'une situation. Ces fiches ont été développées dans une optique de synchronisation cognitive entre différentes disciplines sur un sujet commun : les études énergétiques au sein des quartiers. En outre, ces fiches comme les formulaires de COFFEE sont présentés en langue française, dans un souci d'accessibilité à tout à chacun. Ainsi, en croisant avec les sources citées précédemment, les fiches outils et méthodes et les fiches cas d'étude ont respectivement donné les formulaires outils et modèles et les formulaires cas d'étude dans COFFEE. Les fiches situations quant à elles, ont été conservées et utilisées comme formulaires terrain dans COFFEE.

Les formulaires outil et terrain sont présentés ci-après.

Formulaire d'outil

Nom		Nom outil (acronyme)	
Paramètre	Paramétrage proposé	Autre	Description
Description	<i>Breve description des caractéristiques de l'outil, du système dans lequel il intervient</i>		
Objectif	<i>Objectif de l'outil, utilisation finale</i>		
Institution	<i>Institution(s) ayant développé l'outil</i>		
Financement	<i>Source, public, privé, ..</i>		
Contact	<i>Nom et adresse mail du rédacteur de la fiche</i>		
Site web	<i>Site web de l'outil et/ou lien vers le code</i>		
Citation de référence	<i>Référence article avec doi si possible</i>		
Documentation	<i>Lien vers la documentation</i>		
Licence	<i>Ouverte (préciser licence), freeware, commerciale</i>		
Logo	<i>Logo de l'outil</i>		
Interface utilisateur	<i>Interface graphique, tracés de courbes, ...</i>		
Support	<i>Forum, communauté, ateliers, mail, tutoriels, documentation</i>		
Prérequis	<i>Prérequis éventuels de l'outil (connaissances, environnements, packages)</i>		
Maturité	<i>Via échelle TRL, recherche appliquée / fondamentale</i>		
Enjeux	<i>Autoconsommation, flexibilité énergétique, sobriété, éco-efficacité, ...</i>		Paramètre permettant de décrire les enjeux/challenges sociétaux auxquels l'outil s'adresse.
Secteurs	<i>Electricité, chaleur, froid, gaz, transport</i>		Secteurs considérés par l'outil : électricité, chaleur, gaz, froid, transport mais aussi des spécificités comme demande résidentielle, commerciale, industrielle ; éolien, solaire, biomasse, hydrogène, géothermie, hydraulique, batteries, combustion, modèles de réseaux
Analyses	<i>Énergétique, économique, environnementale, exergétique, sociale</i>		
Phases d'utilisation	<i>Analyse d'opportunités, faisabilité, pré-dimensionnement, conception, fonctionnement (degré de délégation vers humain/automate), démantèlement</i>		La phase d'analyse d'opportunité comprend la prospective ; la phase de fonctionnement intègre les pilotages anticipatifs et réactifs. Le degré de délégation est qualitatif et doit décrire à qui ou quoi délègue-t-on le fonctionnement, et dans quelles proportions. Il est important de préciser ces phases (conception de quoi ? par exemple).
Fonction	<i>Observation, Aide à la compréhension, Aide à la formulation, Recherche/Proposition de solution, Étude de solutions</i>		
Finesse modèle / représentation	<i>macros ou fins, collectif ou individu</i>		
Nature modèle / représentation	<i>Boîte blanche (fonctionnement interne), boîte grise, boîte noire (entrées/sorties)</i>		A considérer du point de vue du concepteur. Boîte blanche / représentation explicative : l'outil étudie le fonctionnement interne du modèle ou de la représentation considéré(e) ; boîte noire / représentation empirique, statistique : l'outil ne considère que les entrées et sorties du modèle ou de la représentation considéré(e) ; boîte grise : hybride. Méthode de modélisation (mathématique / physique) Exemples: boîte blanche - optimiseur MILP, boîte noire - module FMU.
Échelle temporelle	<i>Horizon : années, jours, heures, secondes / Pas de temps : mois, semaine, jour, heure, minute, seconde, <seconde</i>		Prendre l'horizon le plus large et le pas de temps le plus réduit possible pour décrire au mieux les capacités de l'outil.
Échelle spatiale	<i>Matériau, composant, unité vie-travail, bâtiment, inter-bâtiments, quartier, réseau urbain, territoire, pays, continent</i>		
Acteurs	<i>Concepteur, utilisateur, destinataire résultats</i> <i>Laboratoire, acteur électro-intensif, gestionnaire de bâtiment, métropole, consommateur final,...</i>		Acteurs concrets interagissant avec l'outil - la méthode - le concept. Précision pour chaque acteur de son ou ses rôles de concepteur, utilisateur ou destinataire résultats, ainsi que d'une catégorisation « d'acteur générique ».
Terrain	<i>Terrain(s) d'étude concret sur lequel(/lesquels) l'outil est utilisé.</i>		

Formulaire de terrain

Nom		Nom terrain	
Paramètre	Paramétrage proposé	Autre	Description (plus exhaustif, langage de vulgarisation nécessaire)
Description	Brève description de l'histoire/du scénario du terrain, les mécanismes d'interaction des acteurs.		
Objectif	Objectif ou problématique du terrain		
Laboratoire	Laboratoire(s) ayant travaillé sur ce terrain		
Contact	Nom et adresse mail du rédacteur de la fiche		
Documents associés	Articles, rapports, présentations, ...		
Données disponibles ?	Mesures, plans, entretiens, questionnaires, ...		
Acteurs	Acteur(s) primaires (impliqués) ; secondaires; type d'acteur : laboratoire, acteur électro-intensif, gestionnaire de bâtiment, gestionnaire de réseau énergétique, métropole, consommateur final,		Si acteurs concrets : précision pour chaque acteur s'il est acteur primaire (directement impliqué), ou secondaire, ainsi que d'une désignation « d'acteur générique »
Terrain	Terrain(s) d'étude concret		Si identifié, ou terrain générique
Enjeux	Autoconsommation, flexibilité énergétique, sobriété, éco-efficacité, ...		Enjeux/challenges sociétaux
Représentativité / Transposabilité	Représentativité / limites de représentativité de la situation		Facteurs et limites de représentativité : spécifique car [...], générique car [...]
	Spécifique, générique, ...		
Pourquoi la situation est-elle établie?	Observation, Aide à la compréhension, Aide à la formulation, Recherche/Proposition de solution, Étude de solutions		Cadre d'application, peut-être spécifié en description
Phase d'intérêt	Phase(s) d'intérêt pour la situation		Phase d'un projet dans laquelle on s'inscrit. La phase d'analyse d'opportunité comprend la prospective ; la phase de fonctionnement intègre les pilotages anticipatifs et réactifs. Il est important de préciser ces phases (conception de quoi ? par exemple).
	Analyse d'opportunités, faisabilité, pré-dimensionnement, conception, fonctionnement, démantèlement		
Échelle spatiale	Matériau, composant, unité vie-travail, bâtiment, inter-bâtiments, quartier, réseau urbain, territoire, pays, continent		

Annexe 20 - Description des niveaux et critères de l'enquête CAUTIC

1. Savoir-faire technique - Banalisation

Comment ça fonctionne ?

Évalue la possibilité pour l'utilisateur d'assimiler la technique nouvelle à ses savoir-faire techniques coutumiers.

- 1.1. Le principe technique du concept est-il suffisamment compréhensible par l'utilisateur ?
- 1.2. Le concept semble-t-il simple à utiliser pour l'utilisateur ?
- 1.3. L'utilisateur peut-il raccrocher les techniques mobilisées par le concept à des techniques existantes ?
- 1.4. L'utilisateur peut-il trouver facilement et choisir les fonctions qui l'intéressent dans le concept ?
- 1.5. Le concept est-il envisageable, pour l'utilisateur, dans un usage courant ?

2. Pratiques - Hybridation

Qu'est-ce que ça apporte ? / A quoi ça sert ?

Évalue la possibilité pour l'utilisateur d'associer l'innovation à ses pratiques courantes.

- 2.1. Le concept suscite-t-il a priori de l'intérêt chez l'utilisateur ?
- 2.2. Le concept complète-t-il, sans les concurrencer, les pratiques existantes de l'utilisateur ?

- 2.3. La comparaison avec les pratiques existantes valide-t-elle les nouvelles pratiques proposées par l'utilisation du concept ?
- 2.4. Le concept résout-il au moins un problème rencontré par l'utilisateur ?
- 2.5. L'utilisateur imagine-t-il une nouvelle organisation personnelle de ses pratiques avec le concept ?

3. Identité active - système de valeurs

À qui ça s'adresse ?

Évalue la possibilité pour l'utilisateur d'approprier l'innovation à son identité privée et professionnelle.

- 3.1. L'utilisateur comprend-il que le concept le concerne et sait-il à qui d'autre celui-ci peut s'adresser ?
- 3.2. Avec le concept, l'utilisateur peut-il agir / jouer personnellement sur son rôle privé /professionnel ?
- 3.3. Le concept est-il compatible avec les valeurs personnelles /professionnelles de l'utilisateur ?
- 3.4. Le concept suscite-t-il un imaginaire d'appropriation chez l'utilisateur ?
- 3.5. Le concept laisse-t-il à l'utilisateur la possibilité d'imaginer des extensions d'usage ?

4. Intégration dans l'environnement social

Comment ça se situe (par rapport à l'existant) ?

Évalue la possibilité pour l'utilisateur d'adapter l'innovation à son environnement privé ou professionnel.

- 4.1. Le concept est-il en phase avec les évolutions en cours, son arrivée sur le marché est-elle plausible ?
- 4.2. Le concept est-il adapté à l'évolution des relations :
 - a) familiales de l'utilisateur ?
 - b) client/fournisseur
- 4.3. Le concept est-il adapté à la place qu'occupe l'utilisateur dans
 - a) son cercle familial
 - b) sa filière économique
- 4.4. Le concept est-il adapté à l'organisation et à l'évolution de :
 - a) sa manière de vivre
 - b) ses manières de travailler

Annexe 21 - Résultats détaillés de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE

Chercheur					
	Tendance	Validation	Invalidation	Condition	NSP
Niveau 1		8	0	2	0
Critère 1.2		4	0	0	0
Critère 1.3		2	0	2	0
Critère 1.5		2	0	0	0
Niveau 2		10	0	7	0
Critère 2.1		2	0	0	0
Critère 2.2		1	0	1	0
Critère 2.3		3	0	3	0
Critère 2.4		2	0	1	0
Critère 2.5		2	0	2	0
Niveau 3		7	0	5	0
Critère 3.1		2	0	2	0
Critère 3.2		2	0	1	0
Critère 3.3		3	0	2	0
Niveau 4		6	0	8	0
Critère 4.1		1	0	1	0
Critère 4.3		4	0	3	0
Critère 4.4		1	0	4	0

Tableau 19 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE pour le public Chercheur. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur

Ingénieur et/ou Collectivité					
	Tendance	Validation	Invalidation	Condition	NSP
Niveau 1		10	0	7	0
Critère 1.1		2	0	1	0
Critère 1.2		3	0	0	0
Critère 1.3		2	0	1	0
Critère 1.4		3	0	2	0
Critère 1.5		0	0	3	0
Niveau 2		11	0	16	1
Critère 2.1		0	0	1	0
Critère 2.2		2	0	2	0
Critère 2.3		3	0	5	0
Critère 2.4		3	0	2	1
Critère 2.5		3	0	6	0
Niveau 3		16	0	7	0
Critère 3.1		8	0	0	0
Critère 3.2		3	0	2	0
Critère 3.3		1	0	3	0
Critère 3.4		2	0	1	0
Critère 3.5		2	0	1	0
Niveau 4		16	0	20	0
Critère 4.1		5	0	3	0
Critère 4.2		2	0	0	0
Critère 4.3		4	0	8	0
Critère 4.4		5	0	9	0

Tableau 20 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE pour le public ingénieurs et/ou collectivités. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur

Collectif Citoyen					
	Tendance	Validation	Invalidation	Condition	NSP
Niveau 1		4	0	2	0
Critère 1.2		1	0	0	0
Critère 1.4		3	0	2	0
Niveau 2		11	1	18	0
Critère 2.1		2	0	0	0
Critère 2.2		2	0	3	0
Critère 2.3		4	1	6	0
Critère 2.4		1	0	6	0
Critère 2.5		2	0	3	0
Niveau 3		7	1	10	0
Critère 3.1		2	0	4	0
Critère 3.2		4	0	3	0
Critère 3.3		1	1	2	0
Critère 3.5		0	0	1	0
Niveau 4		4	0	12	0
Critère 4.1		1	0	2	0
Critère 4.2		0	0	1	0
Critère 4.3		1	0	5	0
Critère 4.4		2	0	4	0

Tableau 21 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE pour le public collectifs citoyens. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur

Critère 2.2 : Les pratiques nouvelles complètent sans les concurrencer les pratiques existantes de l'utilisateur								
Volume de codages	11		Ingénieur et/ou Collectivité	4	Chercheur	2	Collectif Citoyen	5
	5	6						
Synthèse	<p>Le critère est plutôt conditionné.</p> <p>COFFEE n'a pas pour but de venir concurrencer les pratiques déjà existantes, certains bureaux d'étude ont remarqué cet aspect en soulignant que la plateforme pourrait venir aider les novices sur la thématique de l'énergie. Elle peut aussi venir en support de l'enseignement.</p> <p>Cependant des plateformes ou services comme l'ALEC proposent un accompagnement plus personnalisé, c'est alors à COFFEE d'accentuer son caractère différenciant et cela pourrait peut-être passer par les collectifs citoyens qui partagent déjà les mêmes valeurs de partage et font face à des problématiques de capitalisation de la connaissance.</p>							
			Ingénieur et/ou Collectivité	2	Chercheur	1	Collectif Citoyen	2
Validation	<p><u>Argument 1</u> : Un correcteur des asymétries de savoir pour les novices</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extrait 1 : « ça peut venir en complément mais ça ne pourra pas remplacer les services que nos adhérents peuvent proposer » (Ingénieur et/ou Collectivité) <p><u>Argument 2</u> : Un support supplémentaire d'enseignement (cas d'étude concrets / transfert assuré)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extrait 2 : « après nous c'est vrai qu'en école de commerce on adore ce qui est use cases, une grosse partie de la pédagogie est basée sur des cas » (Ingénieur et/ou Collectivité) <p><u>Argument 3</u> : Des valeurs et outils compatibles avec les collectifs citoyens</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extrait 3 : je pense qu'on peut être contributeur, c'est clair que la vocation d'un collectif citoyen c'est de partager des choses, donc on peut ouvrir des cas, des méthodologies qu'on développe, nos accès sur nos supervisions (...) on le fait déjà mais l'ouvrir à d'autres je pense que ça peut être intéressant. » (Collectif Citoyen) 							
			Ingénieur et/ou Collectivité	2	Chercheur	1	Collectif Citoyen	3
Condition	<p><u>Argument 1</u> : se distinguer de l'existant</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extrait 1 : « je pense que des plateformes open data il y en a quand même quelques-unes. » (Ingénieur et/ou Collectivité) <p><u>Argument 2</u> : se positionner par rapport à l'ALEC, un service personnalisé aux collectivités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extrait 2 : « On a l'ALEC qui est aussi un opérateur énergétique fiable avec qui on travaille de longues dates qui joue énormément le rôle que vous préfigurez là-dessus, pour nous c'est clair que c'est déjà mieux qu'une plateforme informatique. » (Ingénieur et/ou Collectivité) <p><u>Argument 3</u> : Un écosystème déjà bien rempli</p>							

	<p>- Extrait 3 : « Sur le principe c'est super cool mais en compétition avec plein d'autres trucs cool. » (Chercheur)</p> <p><u>Argument 4</u> : Un renfort sur la capitalisation de connaissances pour les collectifs citoyen</p> <p>- Extrait 4 : est-ce qu'il faut faire un nouveau canal ou bien se greffer sur les canaux existants ? peut-être que les deux sont compatibles. (Collectif Citoyen)</p>
--	---

Tableau 22 : extrait des résultats (critère 2.2.) de l'enquête qualitative sur les usages utilisateurs de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE. Crédit : F. Forest, T. Carrano et auteur.

Annexe 22 - Scénarios d'usage de COFFEE

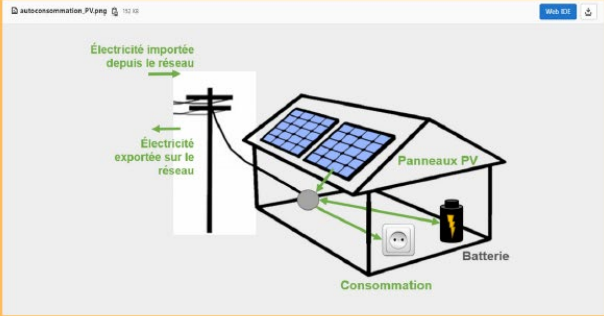
Scénario 1 :



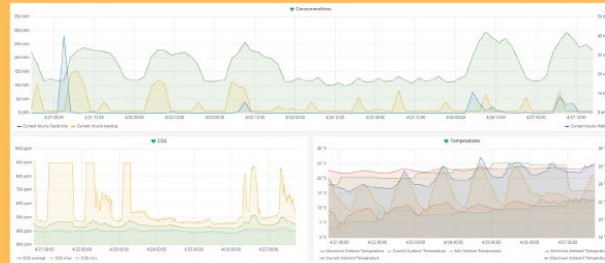




A son arrivée sur la plateforme, Béatrice accède à la première rubrique: la bibliothèque de cas d'étude. Elle choisit alors le rapport sur la production photovoltaïque. Ce document complet lui permet de comprendre les outils pour la conception de production photovoltaïque.



Suite à la lecture du cas d'étude, Béatrice se dirige vers la partie données et notamment celles concernant le niveau d'ensoleillement de la zone où est établi le projet



Ensuite, Béatrice peut se servir d'outils de modélisation énergétique pour comparer ses données de consommation énergétique avec un modèle photovoltaïque via un jupyter notebook



The screenshot shows the title 'Dimensionnement d'un système photovoltaïque en autoconsommation'. Below the title, there is introductory text in French explaining the notebook's purpose: 'Ce jupyter notebook a été développé dans le cadre d'un atelier de formation à l'énergie décarbonée...'. It also includes a section titled 'Objectif du notebook'.



The screenshot shows a code cell with Python code for data processing and analysis. Below the code, there is a small line plot showing a time series of data.

Enfin, pour achever sa connaissance primaire en terme de production photovoltaïque, Béatrice se documente dans la section articles scientifiques.



HAL
archives-ouvertes.fr

Towards an energy open science approach at district level: application to Grenoble Presqu'île
Sacha Hodenq, Benoît Delinchant, Wurtz Frederic, Nils Artigas, Jérôme Ferrari, Tiansi Laranjeira, Lou Morriet, Vincent Benjamin, Debray Francois

► **To cite this version:**

Sacha Hodenq, Benoît Delinchant, Wurtz Frederic, Nils Artigas, Jérôme Ferrari, et al. Towards an energy open science approach at district level: application to Grenoble Presqu'île. 1st International Workshop on Open Design & Open Source Hardware Product Development, Mar 2020, Grenoble, France. hal-04912226.



Alors, la plateforme COFFEE a permis à Béatrice d'acquérir les bases du savoir pour suivre la conception de production photovoltaïque et ainsi limiter les asymétries de savoirs potentiels vis à vis d'un expert

Suite à cette expérience, Béatrice fait un retour en publiant son rapport d'étude dans le forum afin de faire réagir la communauté et enrichir la plateforme

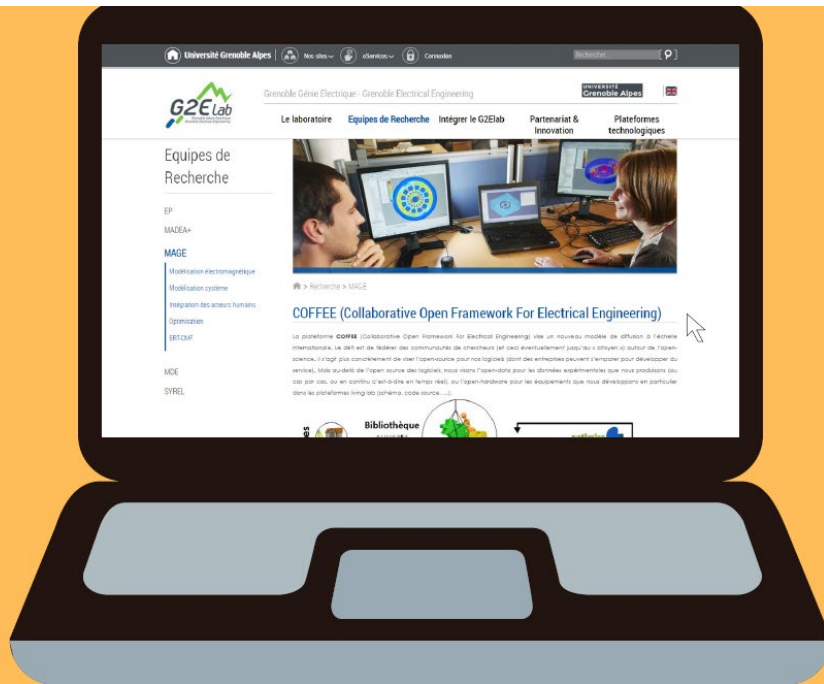
Bonjour, dans le cadre d'un projet d'installation de panneaux photovoltaïques sur le toit d'un bâtiment public, je vous joins mon rapport d'étude pour partager mon expérience et échanger sur les différentes données relevées.
Bonne journée et à bientôt

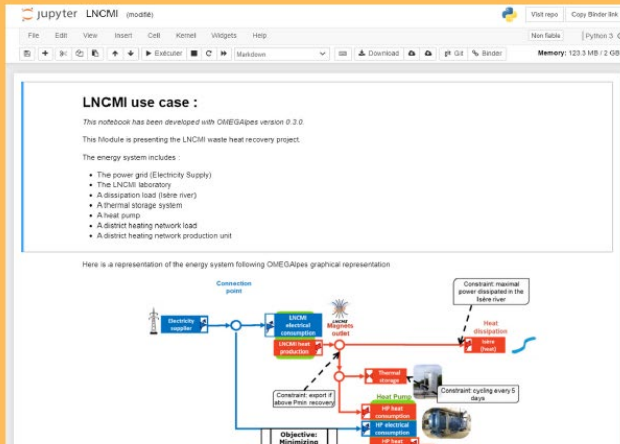


Scénario 2 :



Alain est Maître de Conférence à Toulouse, il cherche à comparer son outil de dimensionnement de systèmes énergétiques à ceux développés au G2Elab





Alain explore la documentation des outils pour bien saisir les capacités de ceux-ci. Il propose de collaborer autour de ce cas d'étude sur le forum

Bonjour, je me présente Alain, maître de conférence à l'université Paul Sabatier de Toulouse. Je cherche à comparer mon système de dimensionnement de systèmes énergétiques avec ceux du G2Elab. Je vous invite à collaborer avec moi pour développer un module plus performant. Merci d'avance.



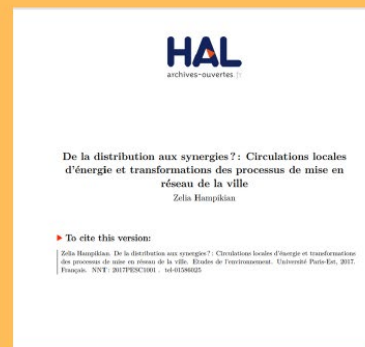
- Suite à des retours enthousiastes, il développe un module permettant de calculer plus finement le bilan environnemental sur le cas d'étude. Il teste son module et son fonctionnement avec l'outil. Une fois que tout fonctionne, il soumet son module, qui peut ensuite être validé et intégré à l'outil.



Bonjour, je me présente Alain, maître de conférence à l'université de Toulouse. Je cherche à comparer mon système de dimensionnement de systèmes énergétiques avec ceux du G2Elab. Je vous invite à collaborer avec moi pour développer un module plus performant. Merci d'avance.



- Au final, Alain aura participé à l'amélioration de l'outil, qui permet de comprendre plus finement les impacts environnementaux du projet de récupération de chaleur. Cette collaboration simplifiée par les données, outils et cas d'étude ouverts, pourra conduire à la rédaction d'un article commun avec le G2Elab, en open access bien évidemment !



Scénario 3 :



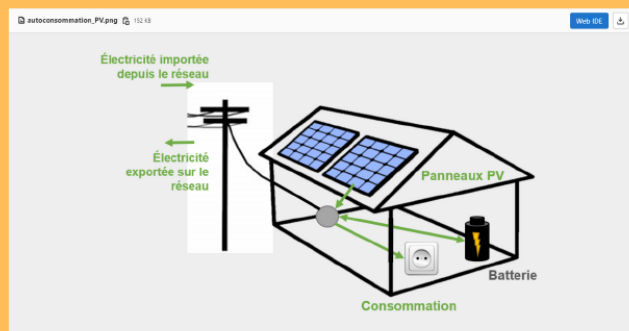
Cédric est développeur dans un tiers lieu sur les questions d'autonomie énergétique. Il cherche à utiliser ses données locales pour déterminer le productible éolien et solaire sur son lieu



- Il commence à jeter un coup d'oeil aux publications en open access pour se renseigner sur des travaux scientifiques



- Suite à sa lecture, il se plonge dans un rapport d'étude disponible sur la plateforme, pour mieux savoir comment utiliser ses données



- Le rapport d'étude le renvoie naturellement vers les outils de modélisation qui permettront à Cédric d'obtenir lui-même des résultats en utilisant ses propres données locales



- Cependant, Cédric rencontre quelques difficultés au niveau de la compréhension de l'outil. Il se rend alors dans l'espace FAQ sur le forum pour mieux cerner son utilisation et achever son étude



- Grâce aux outils de modélisation, Cédric cherche à discuter avec la communauté de ses résultats pour trouver une solution répondant à ses besoins ●

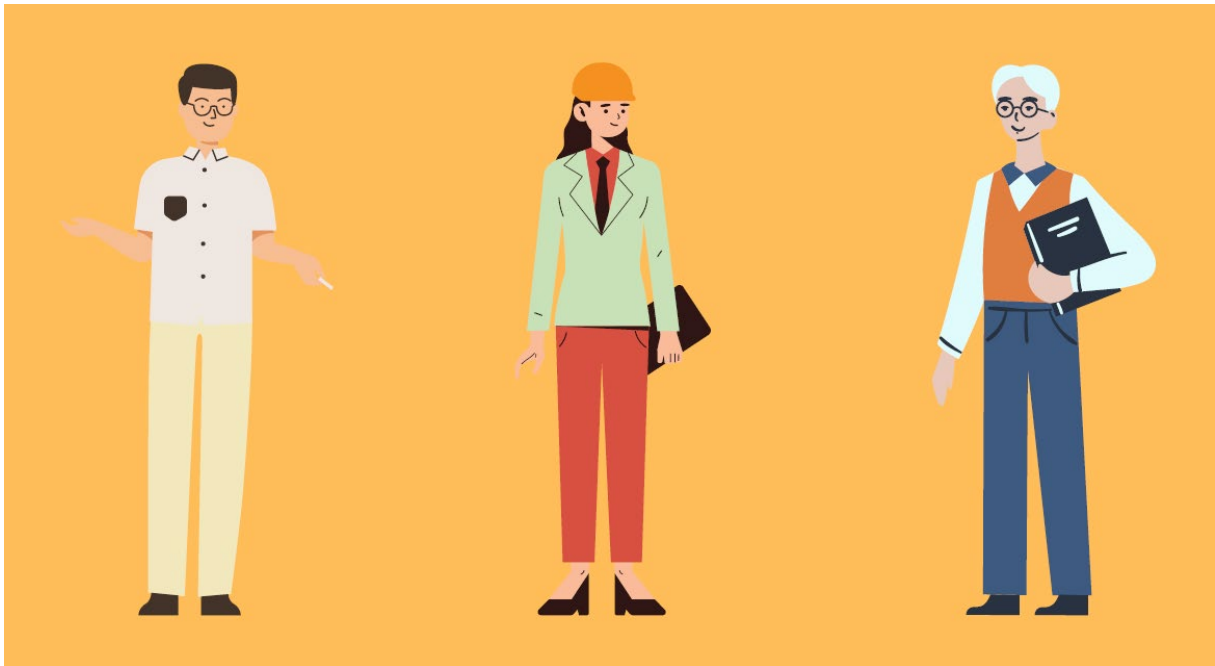
Bonjour à tous, je m'appelle Cédric, je suis développeur dans un tiers-lieu. Je cherche à utiliser mes données locales pour déterminer le productible éolien et solaire sur mon lieu. Suite à l'utilisation des outils de modélisation je cherche à discuter avec des spécialistes de mes résultats pour trouver la solution optimale. Je vous remercie par avance de votre attention



- Suite à des échanges avec la communauté, Cédric perçoit qu'une solution de solaire thermique pourrait être la plus pertinente et décide de poursuivre ses recherches en ce sens ●



Scénario complémentaire :



● On retrouve nos 3 ●
protagonistes dans un
projet collaboratif initié sur
le forum de COFFEE. Ils
s'interrogent sur l'impact
environnemental d'un
système de panneaux
photovoltaïques combinés
à une batterie ●



Alain est Maître de Conférence à Toulouse, il pourra alimenter le débat grâce à son module et son expertise en mesure d'impact environnemental

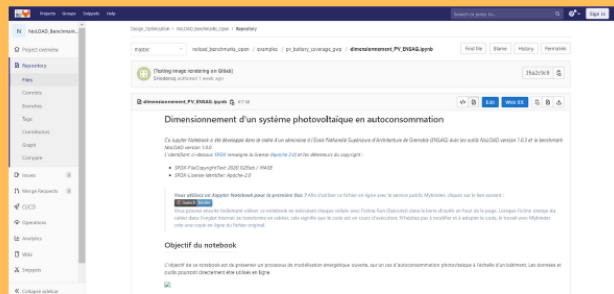
Béatrice est ingénieure dans le service énergie d'une métropole. Elle nous donnera un peu plus de précisions avec son cas d'étude, notamment sur la mesure de performances réelles





Cédric est bénévole dans un tiers-lieu. Il complètera ce duo de professionnels de l'énergie en apportant son savoir-faire et son expérience citoyenne sur le terrain

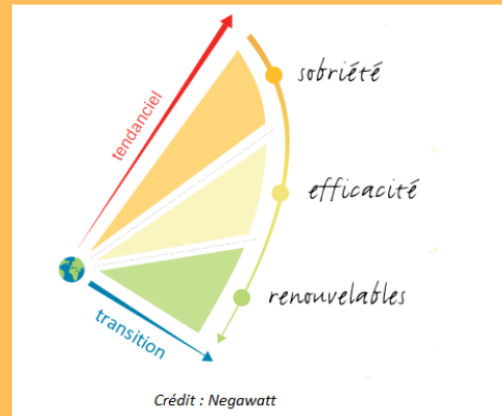
Avant de commencer, Béatrice propose au reste du groupe de s'appuyer sur son récent projet d'installation de panneaux photovoltaïques puisque ces travaux avaient fait l'objet d'un rapport d'étude disponible dans la bibliothèque de la plateforme.



- A partir des données disponibles dans le cas d'étude de Béatrice, Alain propose d'utiliser son module, lui aussi disponible sur la plateforme, pour mesurer les performances énergétiques et mesurer l'impact environnemental



- Suite à des résultats peu encourageants, Cédric propose un scénario de conception alternatif mettant en avant la sobriété énergétique



Crédit : Negawatt

© Association négaWatt

Après l'intervention de Cédric, les 3 personnages se replongent dans leur étude qui se conclura par des résultats beaucoup plus satisfaisants. Les conséquences de ces échanges ne se résument pas aux performances. Regardons de plus près ce que chacun à su tirer de cette aventure



Grâce à cet échange, Alain va intégrer ce type de stratégies à ces travaux de recherches à venir

● Béatrice réfléchit à de nouvelles manières de mener à bien les projets énergétiques à l'avenir en prenant en compte plus finement les impacts environnementaux ●



● Cédric a pu mieux comprendre les flux énergétiques et indicateurs environnementaux sur ce type de projet, ce qui le nourrit pour son projet local de tiers-lieu. ●

Source images : Canva, [Free Media License](#)

Table des figures

Figure I.1 : Émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteurs en 2016. Source image : OurWorldInData.org, Hannah Ritchie, 2020, CC-BY. Source données : [7].....	16
Figure I.2 : Modèle économique du Doughnut de Raworth. Source : [14] Licence Ouverte v2.0	17
Figure I.3 : Illustration d'un système énergétique multi-vecteur et décentralisé. Source : Sandro Bösch, ETH Zürich, tous droits réservés.	19
Figure I.4 : 5R de la définition de contenu ouvert. Source : auteur à partir de Wiley.	23
Figure I.5 : Valeurs clefs associées à la Science Ouverte. Source : auteur.....	23
Figure I.6 : Étapes de la méthode scientifique, comprenant les contenus ouverts. Source : auteur à partir de l'Open Science Training Handbook [61].	25
Figure I.7 : Principales actions institutionnelles relatives à la Science Ouverte ces dernières années en France, en Europe et dans le monde. Source : auteur.	26
Figure I.8 : Pourcentage de publications en accès ouvert par disciplines en Science et Technologie. Source : EU Open Science Monitor, 2009-2018 [91].....	28
Figure I.9 : Avantages de la modélisation énergétique ouverte, entre Science et Société. Source : auteur.	30
Figure I.10 : Consommation d'énergie primaire par source depuis 1800. Source : OurWorldInData.org, CC-BY	33
Figure I.11 : Représentation des connaissances tacites et explicites et processus de transferts. Source : auteur à partir de [145].	36
Figure I.12 : Four solaire pour torréfaction - boulangerie. Source : © Julien Lemaistre - Low-tech Lab.....	39
Figure II.1 : Éléments d'un processus de modélisation énergétique ouvert. Source : auteur d'après [84,87,94].	46
Figure II.2 : Spectre des niveaux d'ouverture pour les outils de modélisation énergétique. Source : auteur.	53
Figure II.3 : Illustration des outils, modèle et cas d'étude pour la modélisation énergétique. Source : auteur	55
Figure II.4 : Coûts et connaissance d'un système suivant les différentes phases. Source : auteur à partir de Fernandez et al. [201] et Zablitz et Zimmer [198].	56
Figure II.5 : Incertitudes du modèles fonction de sa complexité selon la phase d'étude. Source : auteur à partir de Trčka et al. [202].	57
Figure II.6 : Niveaux d'abstraction et de sémantique de modèles énergétiques par rapport à la compréhension des acteurs humains. Source : auteur.	60
Figure II.7 : Bilan des caractéristiques des outils de modélisation énergétique. Source : auteur.	62
Figure II.8 : Bilan des caractéristiques des outils de modélisation énergétique pour la conception d'objets technologiques (différences avec la figure précédente en rouge). Source : auteur	63
Figure II.9 : Capture d'écran de l'interface graphique OMEGAAlpes. Source : auteur.....	66
Figure II.10 : Caractéristiques de l'outil de modélisation énergétique OMEGAAlpes (bleu gras). Source : auteur.	67

Figure II.11 : Développeurs, utilisateurs et acteurs autour de l'outil OMEGAlpes. Source : auteur.....	68
Figure II.12 : Illustration des différents types de cellules dans un notebook. Source : auteur.....	73
Figure II.13 : Exemple d'interface et cellule de résultat de notebook. Source : auteur [I].	74
Figure III.1 : Diagramme de la méthode ORUCE et parties prenantes associées. Source : auteur.	82
Figure III.2 : Diagramme de la méthode ORUCE et parties prenantes associées pour le cas d'étude autoconsommation PV. Source : auteur.....	84
Figure III.3 : Vue d'ensemble d'un notebook ORUCE autoconsommation PV. Source : auteur.	85
Figure III.4 : Import et affichage des données dans un notebook. Source : auteur.	86
Figure III.5 : Schéma représentatif d'un cas d'étude autoconsommation photovoltaïque avec le formalisme de l'outil OMEGAlpes [188], et instanciation du modèle. Source : auteur, Morriet et Pajot.....	87
Figure III.6 : Courbes des flux énergétiques pour le cas d'étude d'autoconsommation PV pour une semaine travaillée en août 2019, issus de l'outil OMEGAlpes. Source : auteur.....	89
Figure III.7 : Gestion des données archétypales dans un notebook ORUCE. Source : auteur.....	91
Figure III.8 : Organisation des éléments d'un notebook ORUCE et activités associées. Source : auteur	93
Figure III.9 : Spectre de reproductibilité appliqué à la méthode ORUCE. Source : auteur à partir de Peng [265].	94
Figure IV.1 : 1. Un aimant de champ intense dans son enceinte 2. Bobine pour champ intense 3. Le LNCMI dans le quartier de la Presqu'Île à Grenoble. Source : auteur à partir d'image du LNCMI et de la ©Ville de Grenoble. Tous droits réservés.	108
Figure IV.2 : Schéma hydraulique du dispositif de valorisation de chaleur fatale du LNCMI. Source : auteur à partir de CCIAG, tous droits réservés.....	109
Figure IV.3 : Gisement de chaleur fatale industrielle en France par niveaux de températures. Source : auteur à partir de données ADEME [300].....	110
Figure IV.4 : Niveaux de température des réseaux de chaleur en France (pourcentages d'énergie livrée). Source : auteur à partir de données FEDENE [305].....	110
Figure IV.5 : Méthode ORUCE appliquée au projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI. Source : auteur	111
Figure IV.6 : Monotone des consommations électriques des aimants du LNCMI, avec A1+A2+A3 la chaleur fatale théorique, A1+A3 la chaleur fatale disponible et A1 la chaleur fatale récupérable. Source : auteur.....	115
Figure IV.7 : Valeurs des différents potentiels de chaleur fatale pour le projet du LNCMI. Source : auteur.	116
Figure IV.8 : Diagramme du modèle simplifié OMEGAlpes pour le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI. Source : auteur	117
Figure IV.9 : Procédure de replanification des profils horaires de température et de puissance du LNCMI, et d'évaluation des performances énergétique et exergetique. Source : auteur.....	117
Figure IV.10 : Diagramme du modèle OMEGAlpes pour le projet de valorisation de chaleur fatale du LNCMI. Source : auteur	118
Figure IV.11 : Blocs d'énergie hebdomadaires de chaleur fatale LNCMI (bleu) et consommation réseau de chaleur (rouge) avant (gauche) et après (droite) replanification. Source : auteur.....	119

Figure IV.12 : Quantités relative et absolue de chaleur fatale valorisée pour les scénarios RECOVERY et FLEXENER pour le projet LNCMI, avec des capacités de stockage entre 0 et 40 MWh. Source : auteur & J. Fitó	119
Figure IV.13 : Destruction d'exergie due à la dissipation de chaleur fatale dans les différents scénarios explorés pour le projet LNCMI, avec des capacités de stockage entre 0 et 40 MWh. Source : auteur & J. Fitó	120
Figure IV.14 : Émissions de GES évitées avec les scénarios recovery et flexener par rapport à référence pour des capacités de stockage entre 0 et 40MWh, avec comparaison aux émissions liées à la consommation électrique du LNCMI. Source : auteur & J. Fitó	121
Figure IV.15 : Vue d'ensemble du notebook LNCMI médiation. Source : auteur.	124
Figure IV.16 : Consommation électrique d'un foyer français et production photovoltaïque par mètre carré (azimut de 0° et inclinaison de 25°) pour trois journées types d'été en rouge, hiver en bleu, et mi-saison en vert. Source : auteur	131
Figure IV.17 : Exemple de profils de production PV et de consommation d'un foyer avec énergie non-autoconsommée (rouge) et non-autoproduite (jaune) le 29 août, pour 8m ² de panneaux PV, une inclinaison de 25° et un azimut de 0°.	133
Figure IV.18 : Résultats d'optimisation avec objectif de minimisation des émissions de GES pour 3 jours types de l'année 2019. Source : auteur.....	135
Figure IV.19 : Résultats d'optimisation avec objectif de maximisation du LCF pour 3 jours types de l'année 2019. Source : auteur.....	136
Figure IV.20 : Courbe de Pareto présentant les résultats d'optimisation entre objectifs de minimisation des émissions de GES et de maximisation du LCF pour un foyer en autoconsommation PV. Source : auteur.....	137
Figure IV.21 : Extrait du notebook présenté aux étudiants de l'ENSAG dans l'environnement Jupyter proposé par Mybinder.....	140
Figure IV.22 : Résultats d'enquête suite au cours avec les étudiants de l'ENSAG - a. appréciation de la méthode ORUCE b. appréciation du format des notebooks.	141
Figure IV.23 : Images du spectacle ONIRI 2070. Crédit : Arno Villenave, Organic Orchestra, tous droits réservés.	142
Figure IV.24 : Système énergétique du spectacle ONIRI, selon le formalisme OMEGAlpes. Source : auteur	143
Figure IV.25 : Image d'une partie du jeu sérieux Sous-Tension. Source : Eco-SESA, tous droits réservés.	145
Figure V.1 : Fonctionnalités principales pour la diffusion d'une plateforme de modélisation énergétique ouverte. Source : auteur.....	152
Figure V.2 : Diagramme de page d'accueil COFFEE. Source : auteur.....	160
Figure V.3 : Exemple d'affichage pour le formulaire cas d'étude COFFEE. Source : auteur et V. Danguillaume.....	162
Figure V.4 : phases de la méthode CAUTIC appliquée au concept de plateforme COFFEE. Source : auteur.	165
Figure V.5 : Occurrences des recommandations pour COFFEE par profils d'utilisateurs.....	169
Figure V.6 : diagramme d'usage systémique de COFFEE. Source : auteur	174
Figure V.7 : schéma de principe de distinction entre le concept et l'implémentation dans ses différentes versions de COFFEE.....	176

Figure V.8 : Illustration des premières briques de l'implémentation COFFEE. Source : auteur, T. Carrano.....	178
Figure 0.1 : Future de la modélisation énergétique ouverte. Source : auteur.....	185
Figure 0.1 : Synergies and trade-offs and gross Sustainable Development Goal (SDG)-interaction with individual mitigation options. Source : figure 5.2 du chapitre 5 du special report de l'IPCC [19], tous droits réservés.....	228
Figure 0.2 : Disponibilité des données énergétiques primaires et finales mondiales. Source : Richie and Roser, The International Energy Agency publishes the detailed, global energy data we all need, but its funders force it behind paywalls. Let's ask them to change it. CC-BY 4.0.....	230
Figure 0.3 : L'espace de conception (design space) des notebooks, formulé après analyse de 60 projets de notebooks dans l'industrie et le milieu académique. Comme le présente le tableau ci-après, chaque projet occupe de multiples points dans chaque dimension de cet espace. Source : Lau et al. [269]. © 2020 IEEE.....	244
Figure 0.4 : Diagramme de la méthode ORUCE médiation et parties prenantes associées. Source : auteur.....	256
Figure 0.5 : Détail des résultats d'optimisation de la courbe de Pareto entre émissions de GES et LCF, comprenant pour les chaque optimisation la surface PV, l'inclinaison, l'azimut, et l'énergie stockée pour les 3 jours types (4 janvier, 29 août, 27 novembre). Source : auteur. .	262
Figure 0.6 : Système énergétique complet du spectacle ONIRI 2070. Source : Kévin Loeslé, Organic Orchestra, Licence CC-BY-SA.....	262

Table des tableaux

Tableau 1 : Motivations à l'ouverture de la modélisation énergétique. Source : auteur d'après Morrison [84].....	48
Tableau 2 : Exemple de métadonnées pour des données d'irradiances. Source : auteur, basé sur le formalisme OEmetadata.....	51
Tableau 3 : Avantages du développement propre (going open) ou de la contribution (joining open) pour des outils de modélisation énergétique ouverte. Source : auteur.	54
Tableau 4 : lexique de recherche reproductible de Goodman et al. [99] adapté au domaine de la modélisation énergétique. Source : auteur	71
Tableau 5 : Résumé des difficultés dans l'usage de notebooks. Source : auteur d'après Chattopadhyay et al [278] et sources mentionnées.	76
Tableau 6 : Caractéristiques des objets ORUCE recherche et ORUCE médiation. Source : auteur.	96
Tableau 7 : Analyse de la transparence de la méthode ORUCE basée sur la transparency checklist de Cao et al., avec validation en vert et validation incomplète en jaune . Source : auteur basé sur Cao et al. [94].....	98
Tableau 8 : Synthèse des recommandations de reproductibilité appliquée à la méthode ORUCE, avec validation en vert , validation incomplète en jaune et invalidation en rouge . Source : auteur	100
Tableau 9 : Bilan des différences techniques entre la production de chaleur du LNCMI et la consommation de chaleur sur le réseau du quartier.	108
Tableau 10 : Scénarios de valorisation de chaleur fatale modélisés dans l'étude pour le LNCMI	114
Tableau 11 : Illustration des intérêts de la méthode ORUCE sur les cas d'étude de chaleur fatale et d'autoconsommation. Source : auteur.	147
Tableau 12 : Inventaire des plateformes de modélisation énergétique ouverte par ordre alphabétique, avec catégories de fonctionnalités (fonctionnalité dominante grisée). Source : auteur.	155
Tableau : Bilan des fonctionnalités des plateformes de modélisation énergétique appliqué à COFFEE. Source : auteur.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 14 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur.....	166
Tableau 15 : Positionnement de l'outil OMEGAlpes. Source : auteur à partir des critères de Groissböck [43].....	241
Tableau 16 : Représentation de caractéristiques de flexibilité d'outils de modélisation énergétique ouverts dont OMEGAlpes. Source : Heider et al. [257], licence CC-BY.....	242
Tableau 17 : Comment les 60 systèmes de notebooks de l'étude (colonnes) se positionnent dans les dimensions de l'espace de conception (lignes) de la figure précédente. Source : Lau et al. [269]. © 2020 IEEE.....	245
Tableau 18 : Catalogues de cas d'études OMEGAlpes pour la chaleur fatale avec référence d'article, langue, code, notebooks, échelles temporelle et spatiale, développements, and objectif de recherche. Source : auteur [188].....	260
Tableau 19 : Catalogues de cas d'études OMEGAlpes pour l'autoconsommation PV avec référence d'article, langue, code, notebooks, échelles temporelle et spatiale, développements, and objectif de recherche. Source : auteur [188].....	261

Tableau 20 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE pour le public Chercheur. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur.....	267
Tableau 21 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE pour le public ingénieurs et/ou collectivités. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur.....	267
Tableau 22 : bilan synthétique par critères des résultats de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE pour le public collectifs citoyens. Crédit : F. Forest, T. Carrano, auteur	268
Tableau 23 : extrait des résultats (critère 2.2.) de l'enquête qualitative sur les usages utilisateurs de l'enquête CAUTIC appliquée à COFFEE. Crédit : F. Forest, T. Carrano et auteur.	270

Résumé

Méthodes et outils pour un processus de modélisation collaboratif et ouvert des systèmes énergétiques

L'énergie apparaît comme un enjeu majeur face aux crises socio-écologiques en cours. La modélisation énergétique permet d'explorer les possibilités de conception et de gestion des composants et systèmes, et donc de discerner des futurs énergétiques soutenables. Or la modélisation énergétique historique ainsi que les principales approches actuelles sont propriétaires et manquent de transparence, même si l'émergence de modèles énergétiques ouverts est prometteuse. Cette thèse introduit les pratiques, intérêts et freins de la modélisation énergétique ouverte, avant de présenter la méthode ORUCE (Open and Reproducible Use Cases For Energy), pensée comme un processus transférable pour rendre ces pratiques accessibles aux chercheurs du domaine. Cette méthode s'attache notamment aux cas d'étude comme bons vecteurs de capitalisation de la connaissance et de reproductibilité. Des cas d'étude concrets au contact des acteurs de l'énergie sont présentés, sur les thématiques de la valorisation de chaleur fatale et de l'autoconsommation photovoltaïque, illustrant la variété d'usage de la méthode ORUCE. Enfin, un concept de plateforme collaborative de modélisation énergétique ouverte est présenté. Ce concept a été affiné dans une enquête axée sur l'expérience utilisateur, et la plateforme qui en découle vise à rendre les études énergétiques et ressources associées accessibles aux parties prenantes au sein de la recherche, des autorités publiques et des collectifs citoyens.

Mots clefs : Modélisation énergétique, Science ouverte, Collaboratif, Systèmes énergétiques, Méthodes, Outils.

Abstract

Methods and tools for a collaborative and open energy modelling process

Energy appears as a major issue in the face of the current socio-ecological crisis. Energy modelling can be used to explore the design and management possibilities of components and systems, and thus to discern sustainable energy pathways. However, historical energy modelling and the main current approaches are proprietary and lack transparency, although the emergence of open energy modelling is promising. This thesis introduces the practices, interests and obstacles of open energy modelling, before presenting the ORUCE (Open and Reproducible Use Cases For Energy) method, designed as a transferable process to make these practices accessible to researchers in the field. This method focuses in particular on use cases as good vectors for reproducibility and capitalising on knowledge. Actual use cases in contact with energy stakeholders are presented, on the topics of waste heat recovery and photovoltaic self-consumption, illustrating the variety of uses of the ORUCE method. Finally, a concept of a collaborative open energy modelling platform is presented. This concept was refined in a user experience inquiry, and the resulting platform aims to make energy studies and associated resources accessible to stakeholders in research, public authorities and citizen collectives.

Keywords: Energy Modelling, Open Science, Collaborative, Energy systems, Methods, Tools.