

*L'électrification intelligente
au service de
la transition énergétique*



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

Présenté par **Sacha Hodencq**

devant le jury :

- Frédéric WURTZ - directeur de recherche, CNRS, Directeur de thèse
- Benoit DELINCHANT - professeur des universités, Grenoble-INP, Co-directeur de thèse
- Arnaud HUBERT - professeur des universités, Université de Technologie de Compiègne, Rapporteur
- Salvy BOURGUET - maître de conférences, Université de Nantes, Rapporteur
- Tatiana REYES CARRILLO - maître de conférences, Université de technologie de Troyes, Examinatrice
- Jean-François BOUJUT - professeur des universités, Grenoble-INP, Examineur
- Pierre HAESSIG - maître de conférences, CentraleSupélec, Examineur
- Robin GIRARD - chargé de recherche, Mines Paris - PSL - Centre PERSEE, Examineur

UMR CNRS 5269 – Université Grenoble Alpes – CNRS - Grenoble-INP

23 septembre 2022



L'énergie, un enjeu majeur

■ L'énergie fait partie de notre quotidien



■ et provient de différentes ressources :

Renouvelables



Fossiles



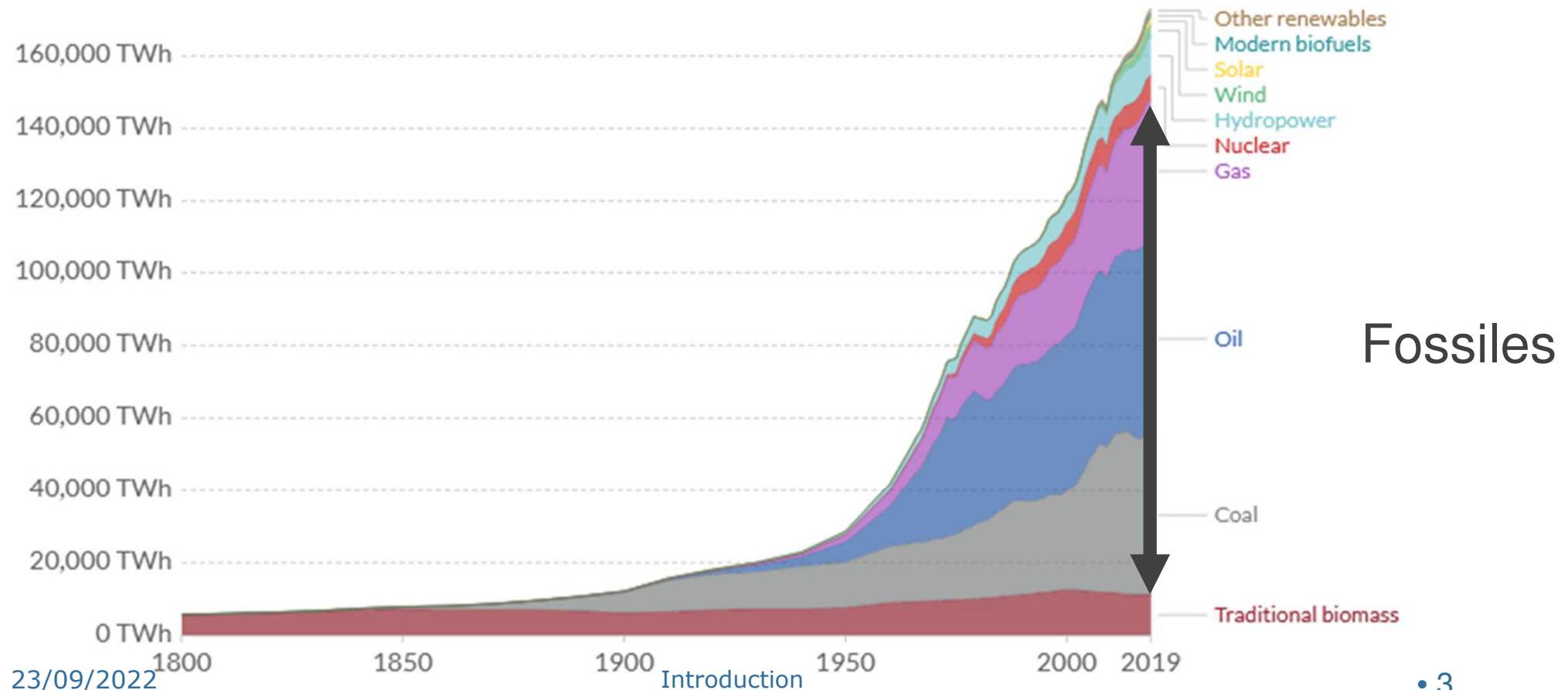
Nucléaire



L'énergie, un enjeu majeur

■ Notre consommation énergétique mondiale...

- Est principalement d'origine fossile
- A drastiquement augmenté



23/09/2022

Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

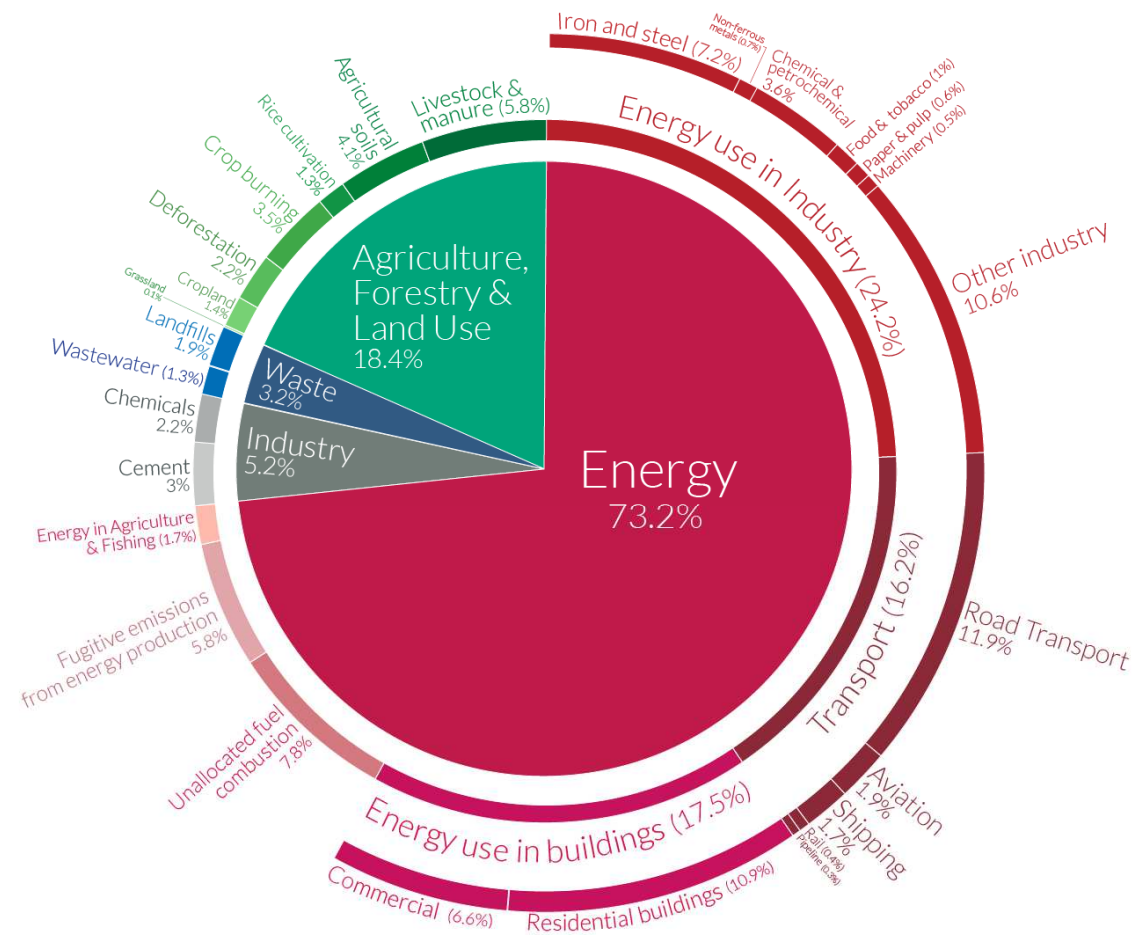
L'énergie, un enjeu majeur

La consommation d'énergie liée aux activités humaines a des impacts :

■ Écologiques

Émissions mondiales de Gaz à Effet de Serre (GES) par secteur

2016
49,4 milliards de tonnes équivalentes émises



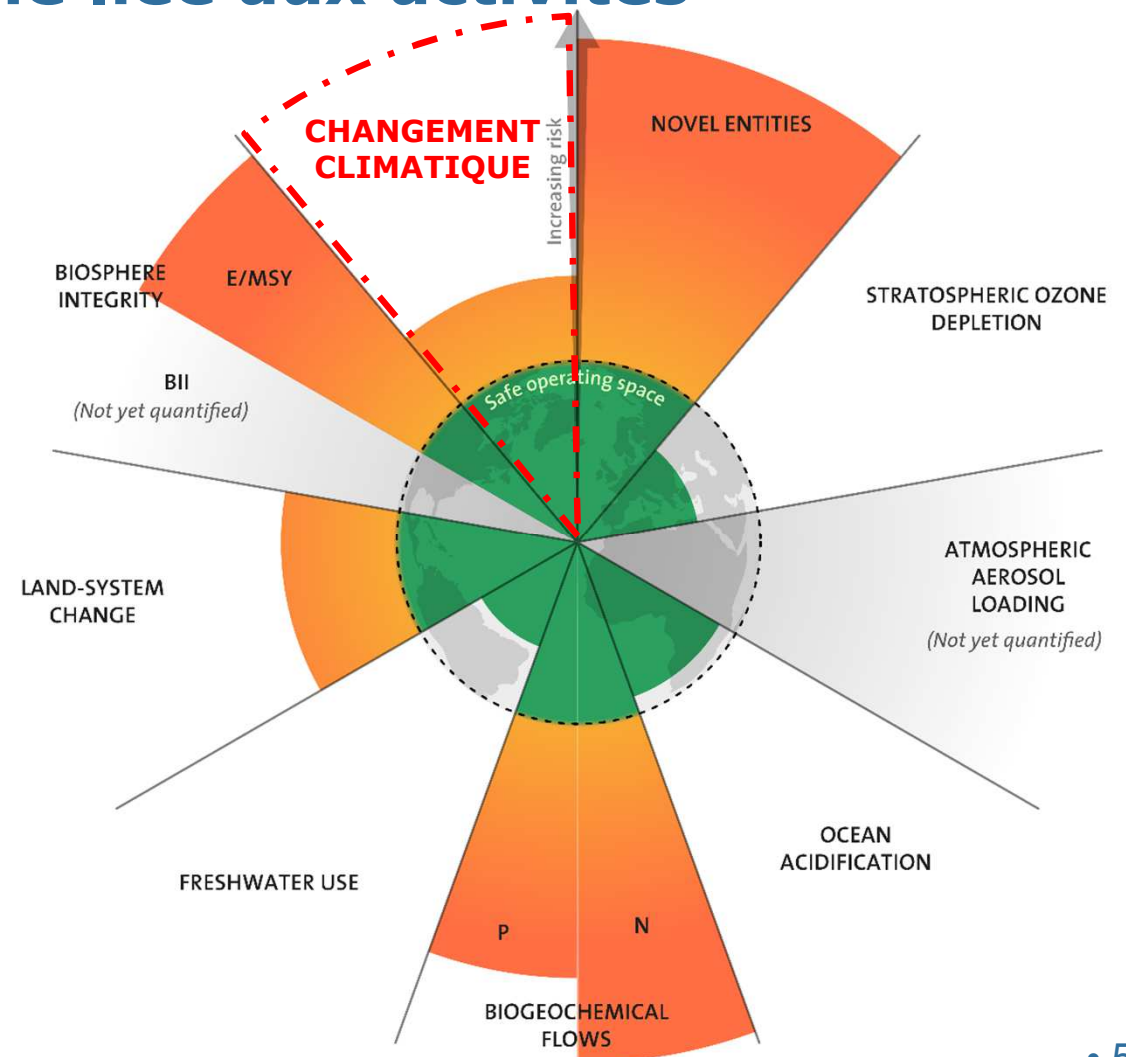
L'énergie, un enjeu majeur

La consommation d'énergie liée aux activités humaines a des impacts :

■ Écologiques

6 sur 9 limites planétaires dépassées.

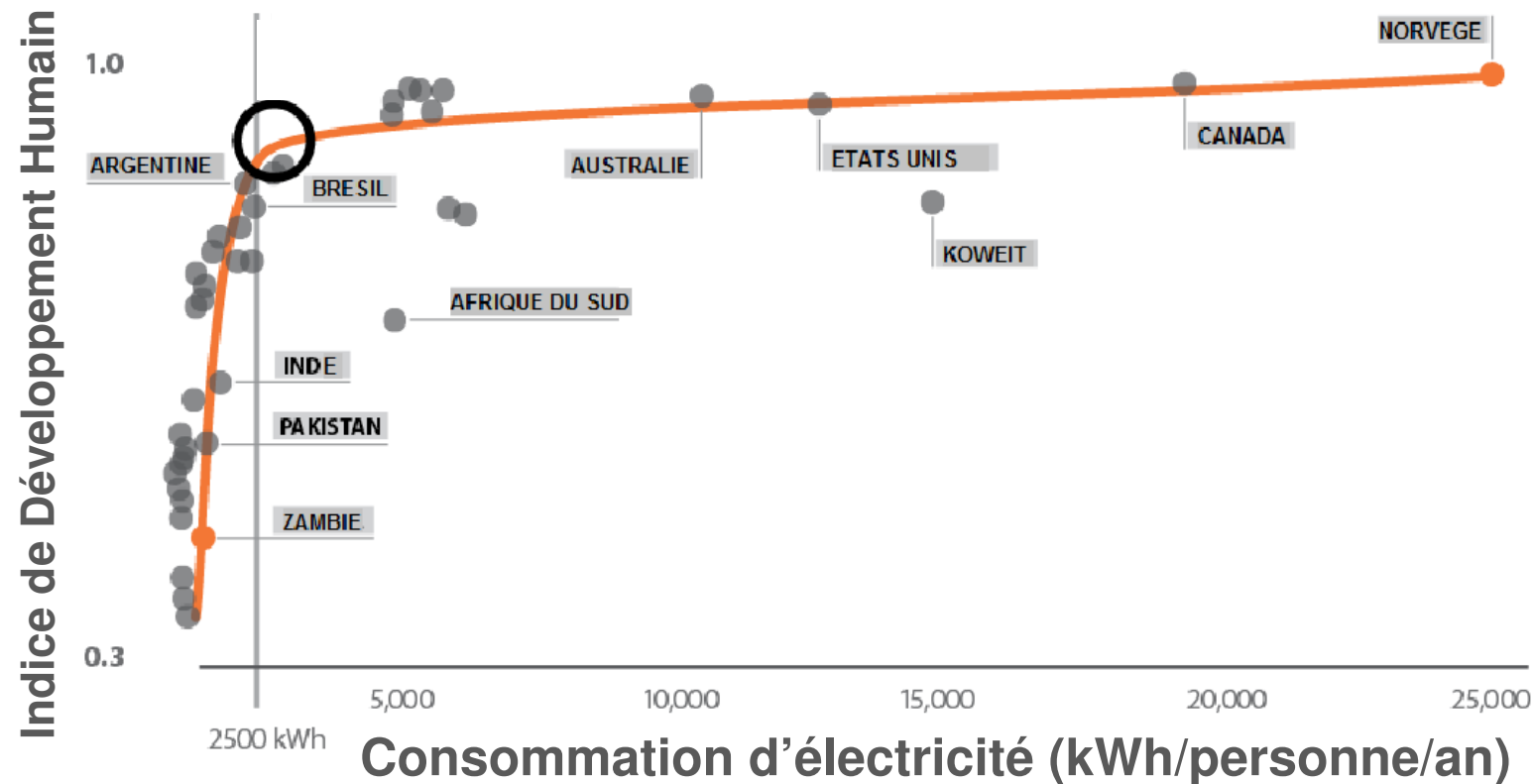
Source : J. Lokrantz/Azote based on Steffen et al. 2015., CC BY 4.0,



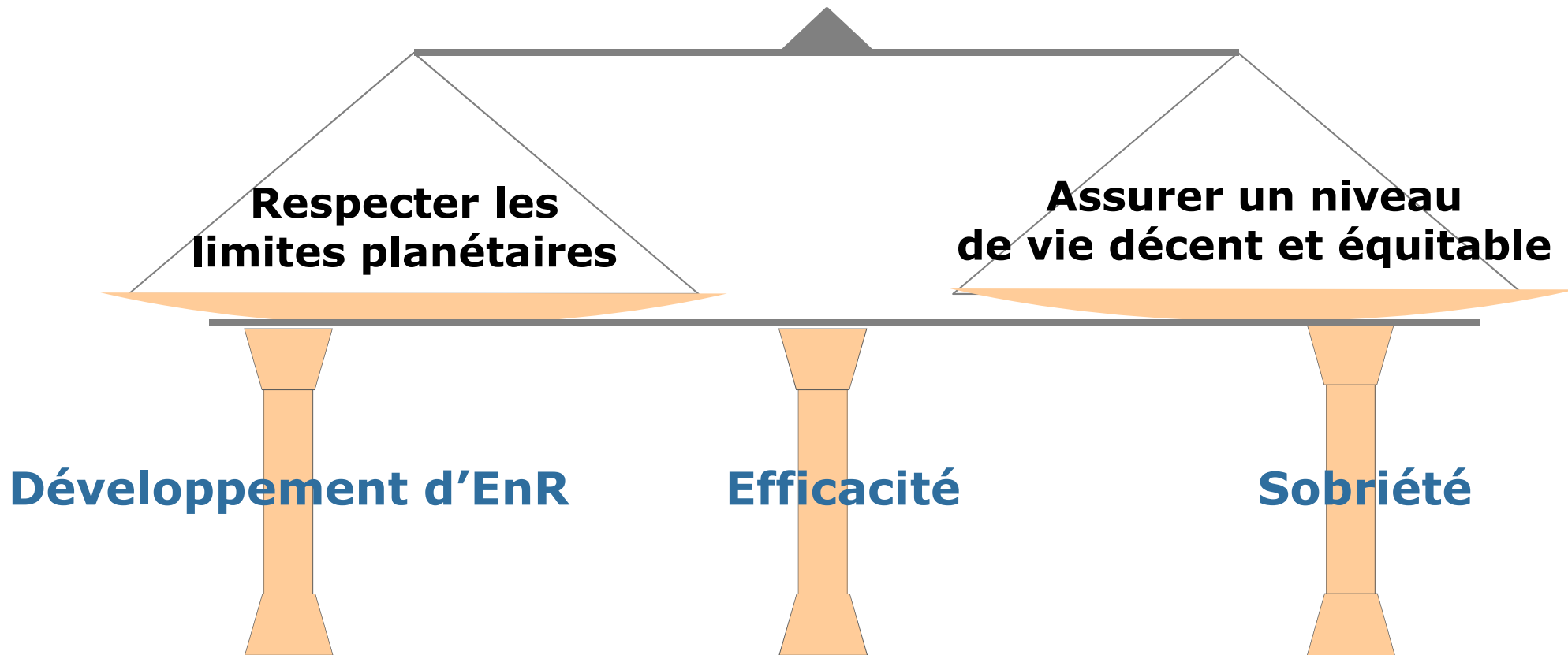
L'énergie, un enjeu majeur

La consommation d'énergie liée aux activités humaines a des impacts :

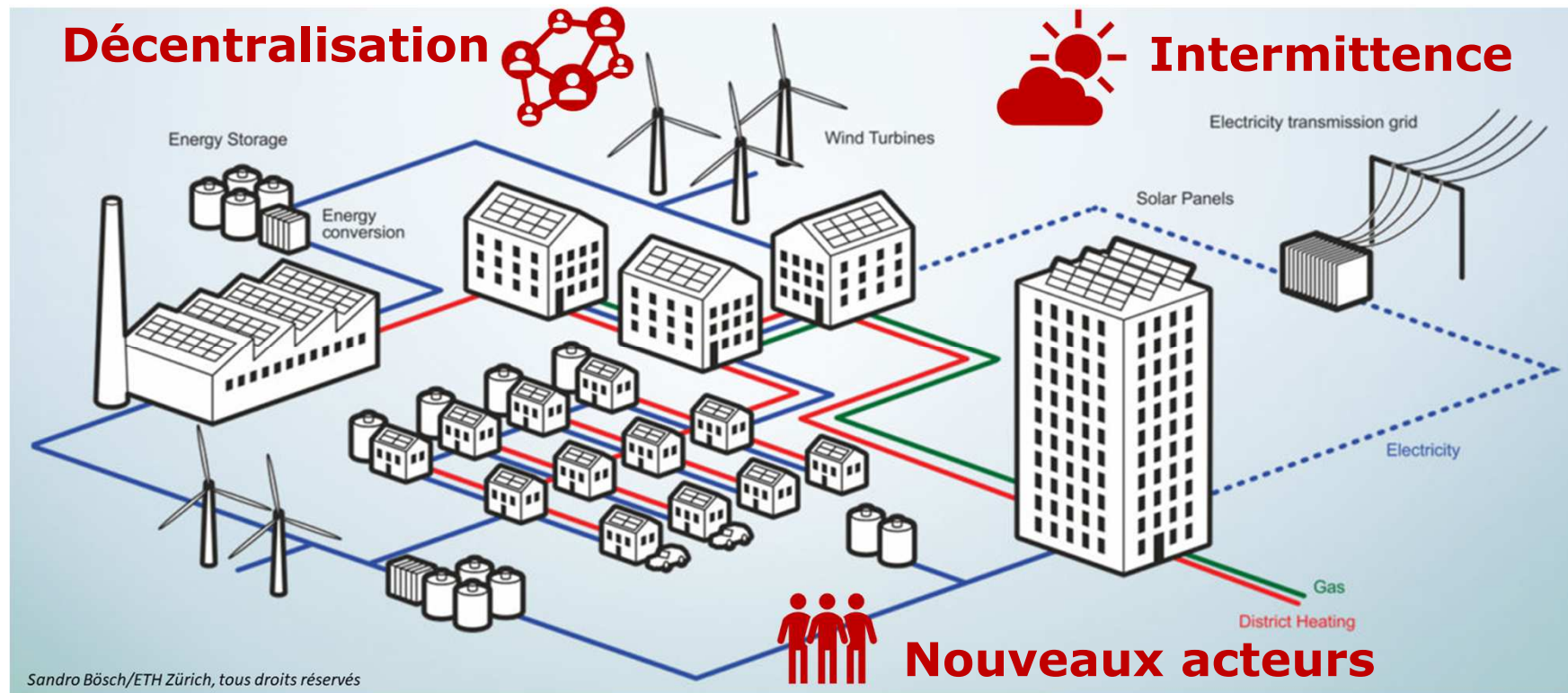
- Écologiques
- Sociaux



Vers des futurs énergétiques soutenables



Systemes énergétiques : des systemes socio-techniques



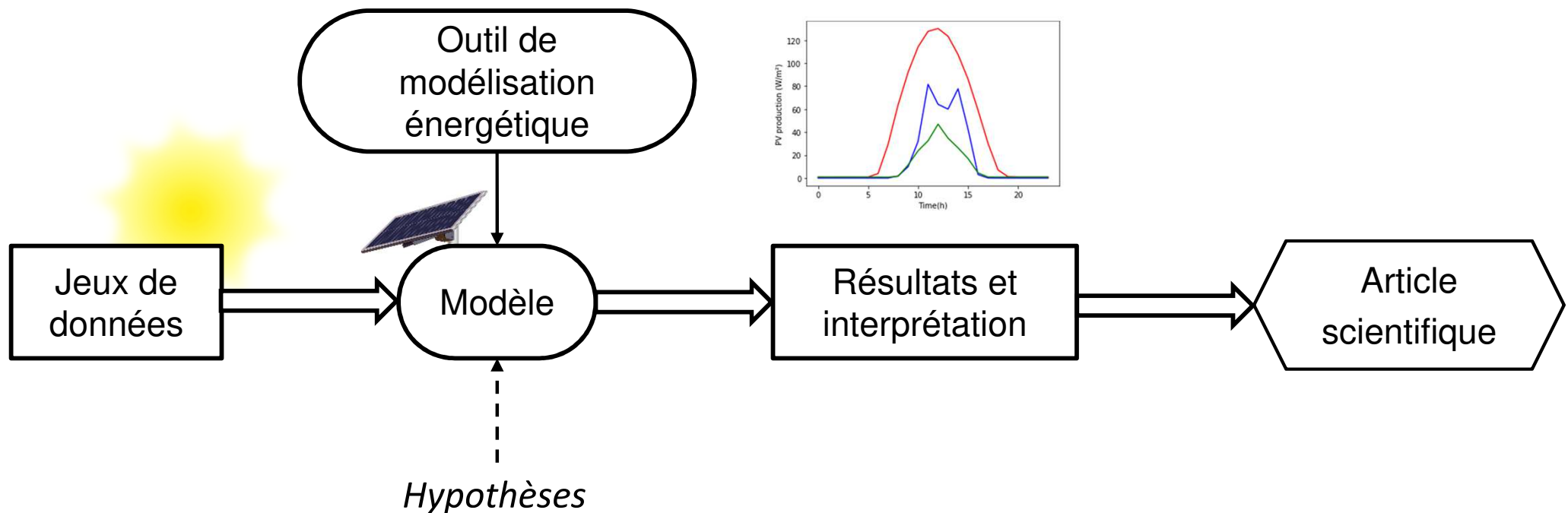
COMPLEXITÉ



{ Aspects non-techniques
Aspects techniques → **Modélisation énergétique**

La modélisation énergétique

- Modélisation énergétique** = représentation formalisée d'un objet énergétique pour l'étudier selon un objectif et dans un contexte donné, grâce à une formulation mathématique



La modélisation énergétique

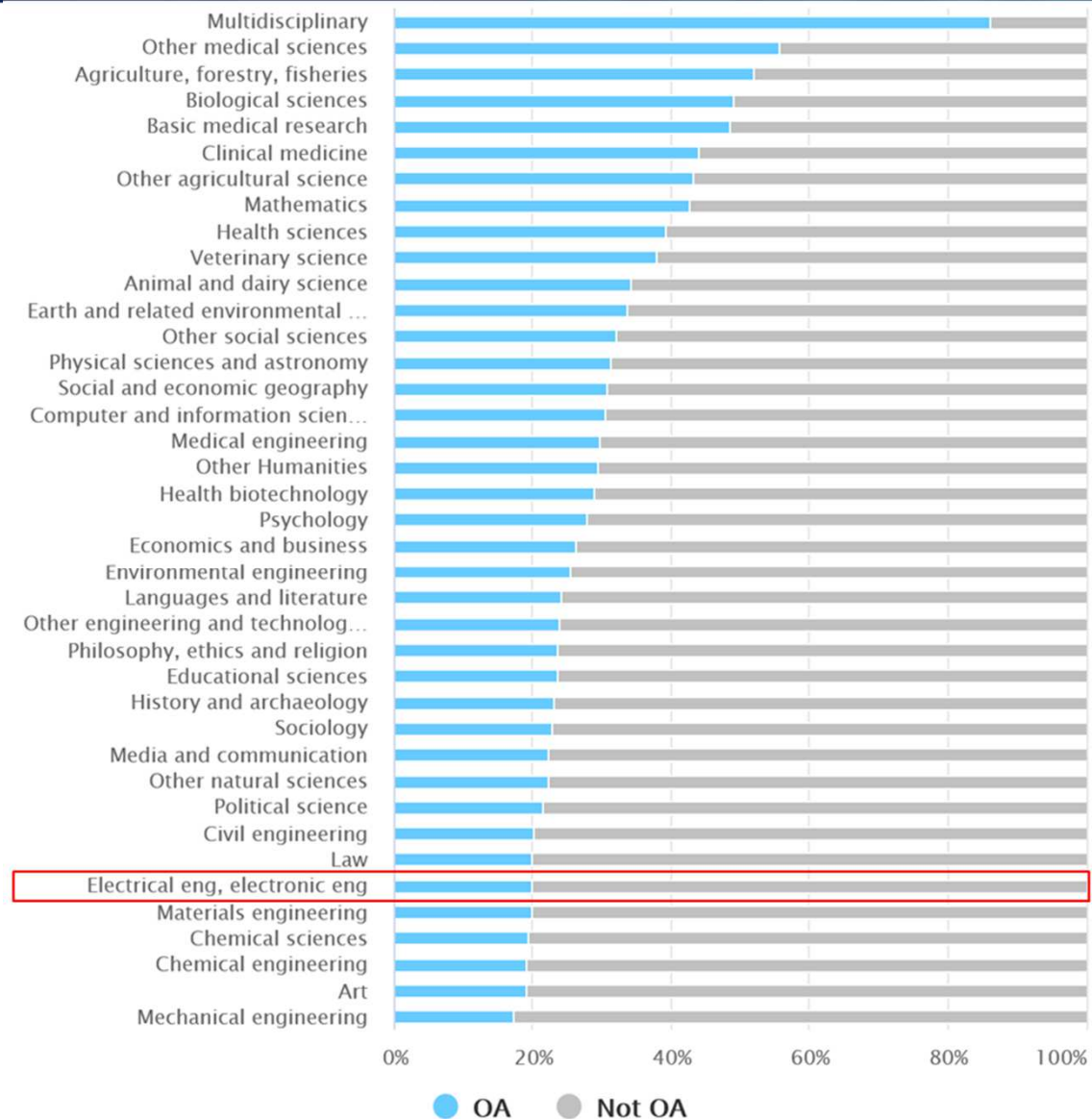
- Modélisation énergétique** = représentation formalisée d'un objet énergétique pour l'étudier selon un objectif et dans un contexte donné, grâce à une formulation mathématique



La modélisation énergétique

Articles en open-access par discipline

Source : EU Open Science Monitor,
2009-2018
Tous droits réservés



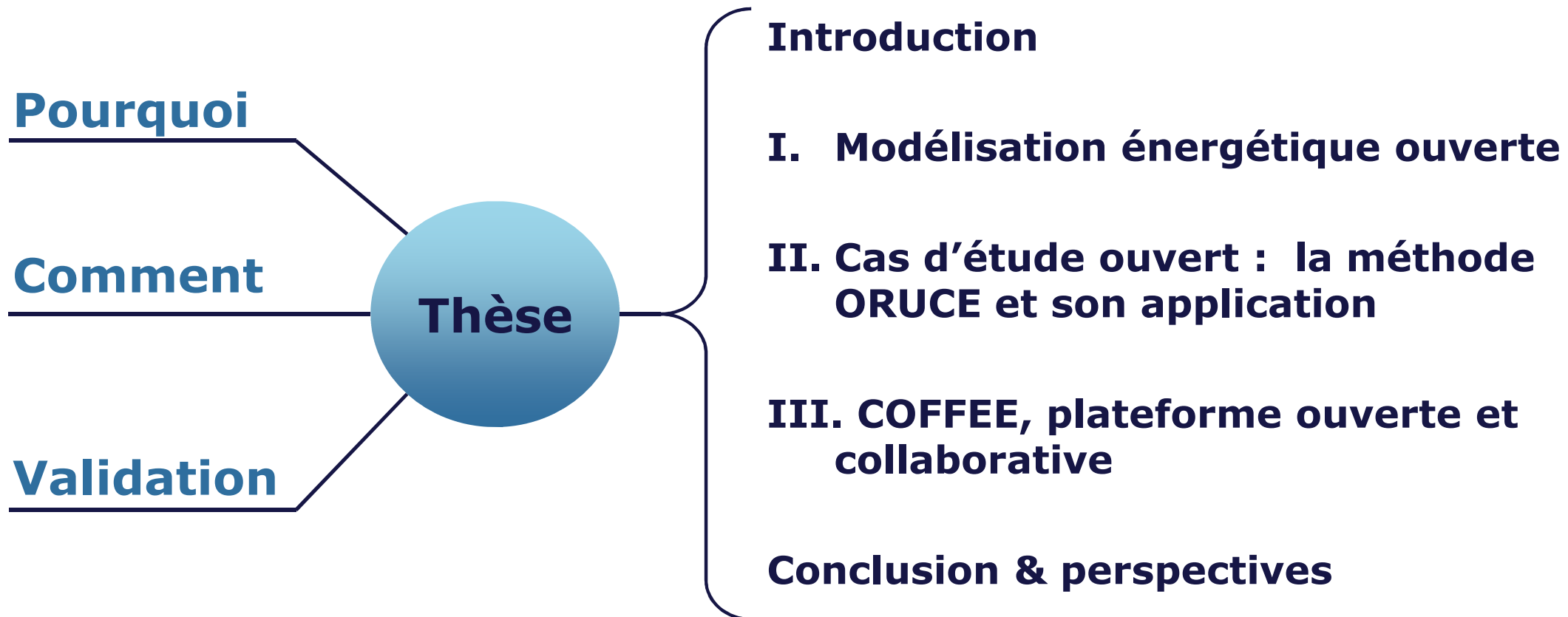
Problématiques

- **Pourquoi** développer une modélisation énergétique ouverte ? Et pourquoi n'est-elle pas la norme ?

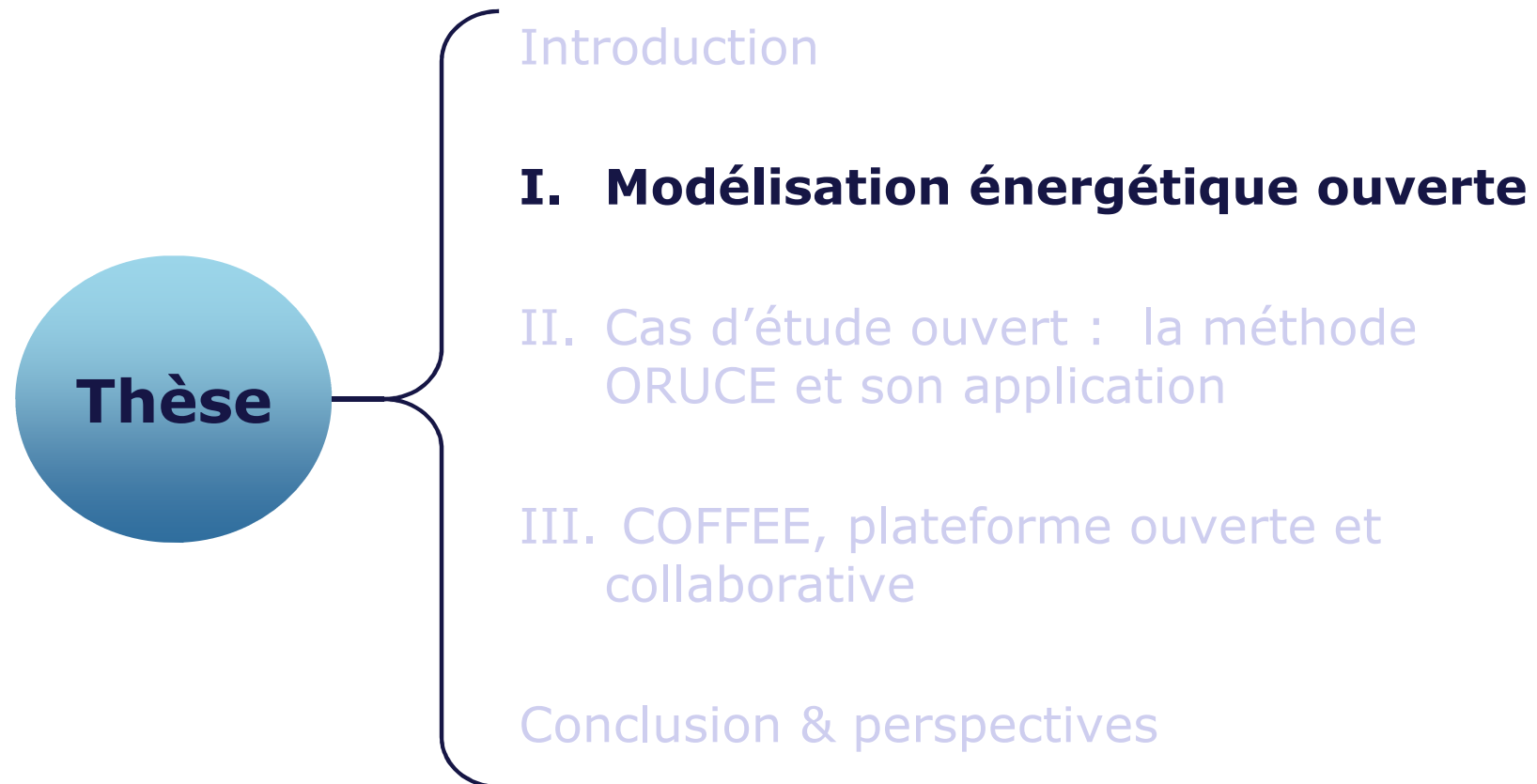
- **Comment** en développer les pratiques pour atteindre des objectifs de transparence, de collaboration et de reproductibilité ? En impliquant...
 - Les chercheurs
 - Les autorités publiques et entreprises
 - Les collectifs citoyens

- Comment **valider** la pertinence de ces nouvelles pratiques ?

Plan de la présentation



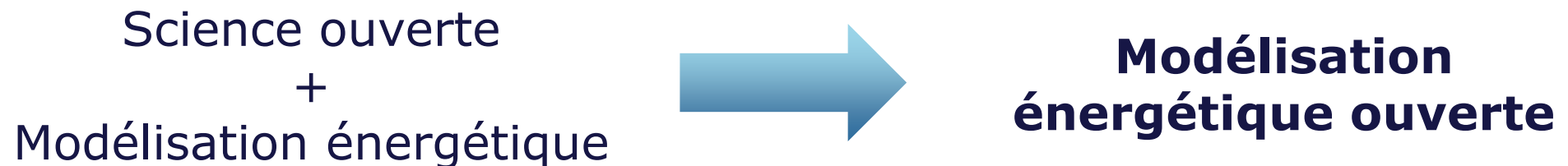
Modélisation énergétique ouverte



De la science à la modélisation énergétique ouverte

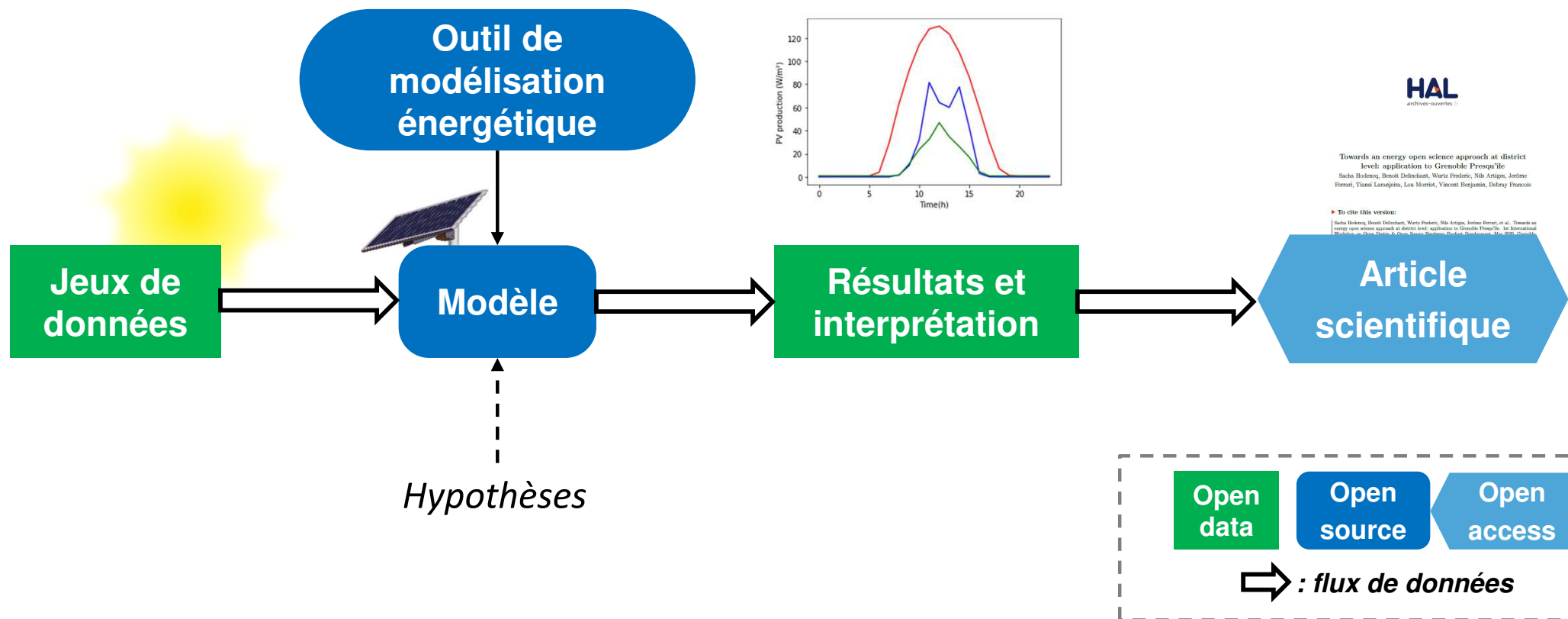
■ La science ouverte :

- **Un mouvement** visant à rendre la recherche, les données et la diffusion scientifiques accessibles.
- **Un savoir** transparent et accessible, partagé et développé via des réseaux collaboratifs.



Modélisation énergétique ouverte : quoi ?

- **Modélisation énergétique ouverte** : mise à disposition de données, modèles énergétiques et résultats de manière transparente et accessible.



Modélisation énergétique ouverte : comment ?

- **Modélisation énergétique ouverte** : mise à disposition de données, modèles énergétiques et résultats de manière transparente et accessible.

Ouverture technique : gratuit, format ouvert, compréhensible et accessible
→ *Plateformes, documentation*

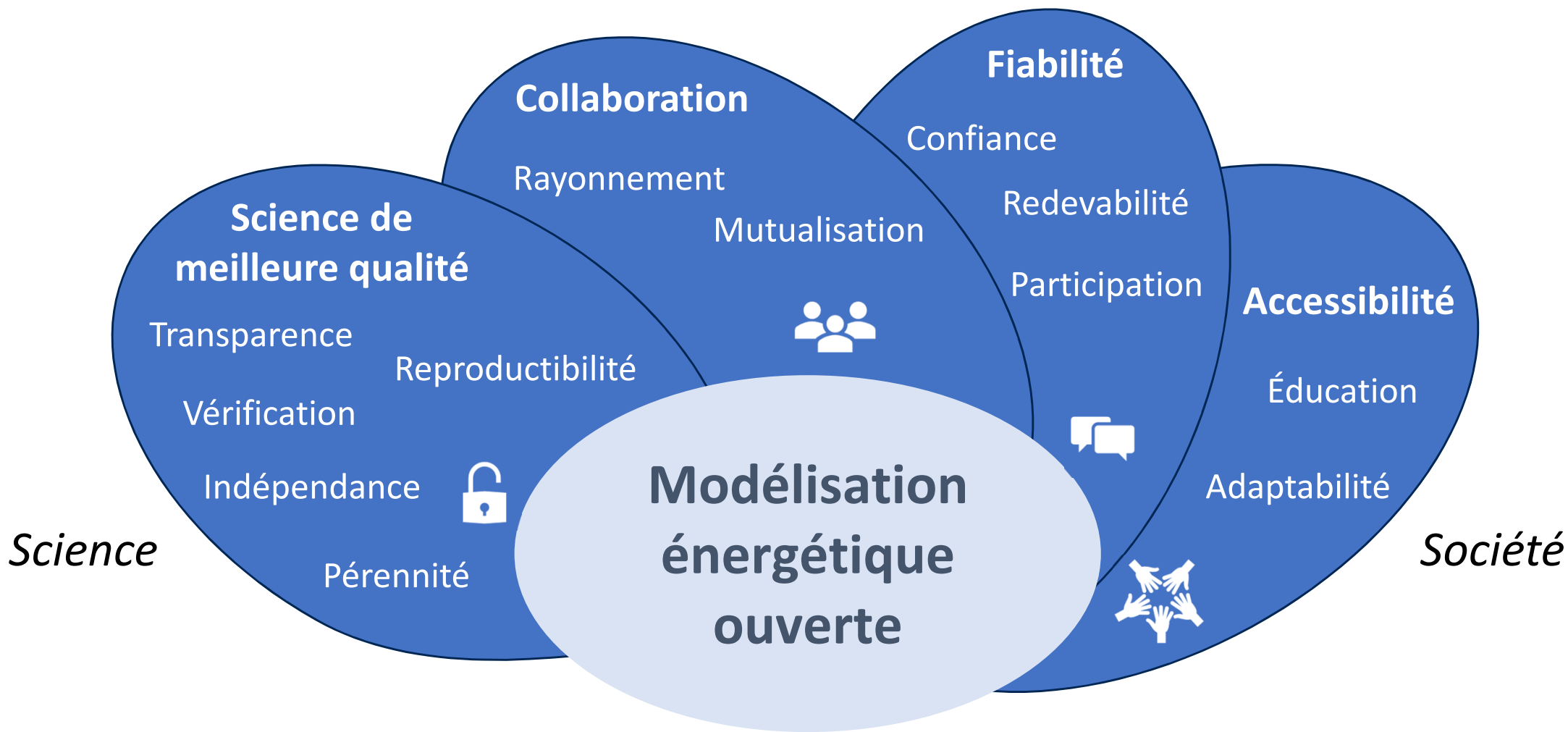
Ouverture juridique : choix de licence



« *As open as possible, as closed as necessary* »

Lignes directrices de l'Union Européenne

Modélisation énergétique ouverte : pourquoi ?



Modélisation énergétique ouverte : freins et limites



- Besoin d'**acculturation**



- Stratégie d'**enfermement propriétaire** VS **manque d'utilisabilité**



- Non-alignement des **pratiques ouvertes** et **académiques**



- **Surcharge d'information**

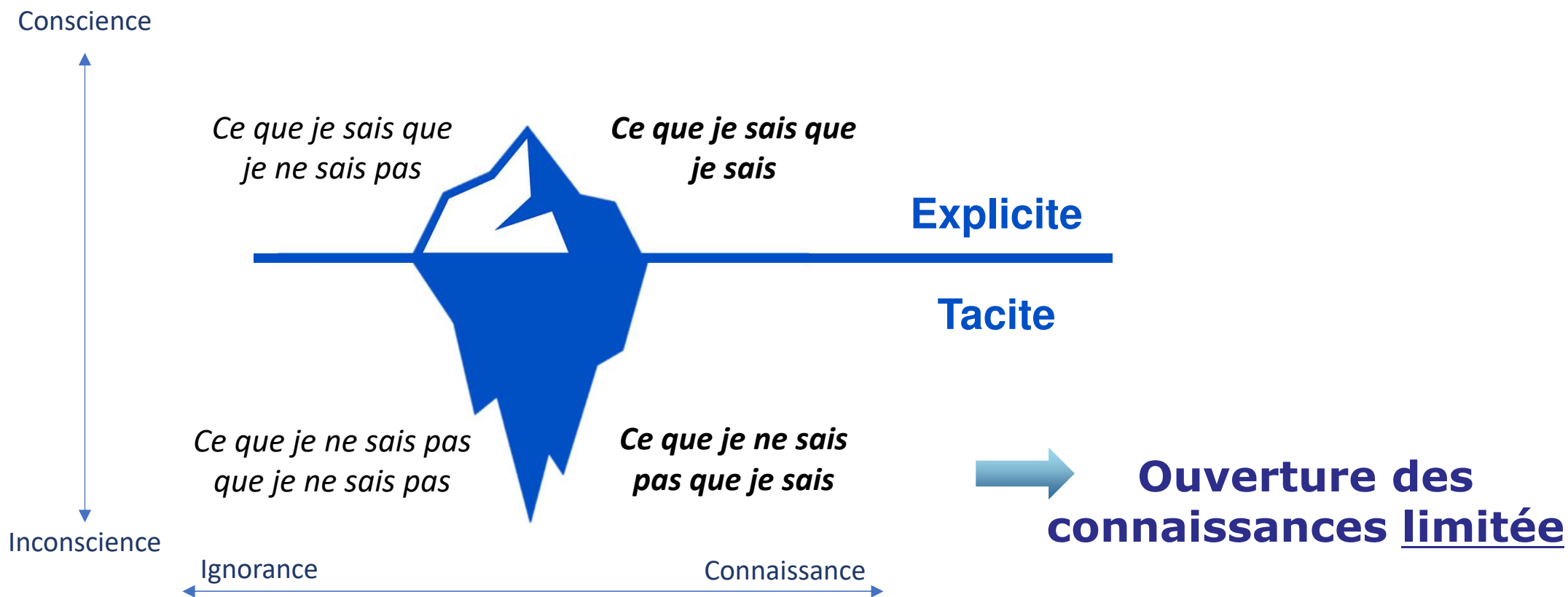


- Changements profonds **politiques & culturels**

Modélisation énergétique ouverte : freins et limites

■ Un détour épistémologique...

- Connaissances explicite / tacite

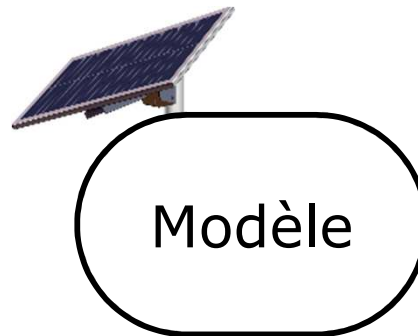


Modélisation énergétique ouverte : freins et limites

■ Un détour épistémologique...

● Constructivisme :

$$Ax + By = 0$$

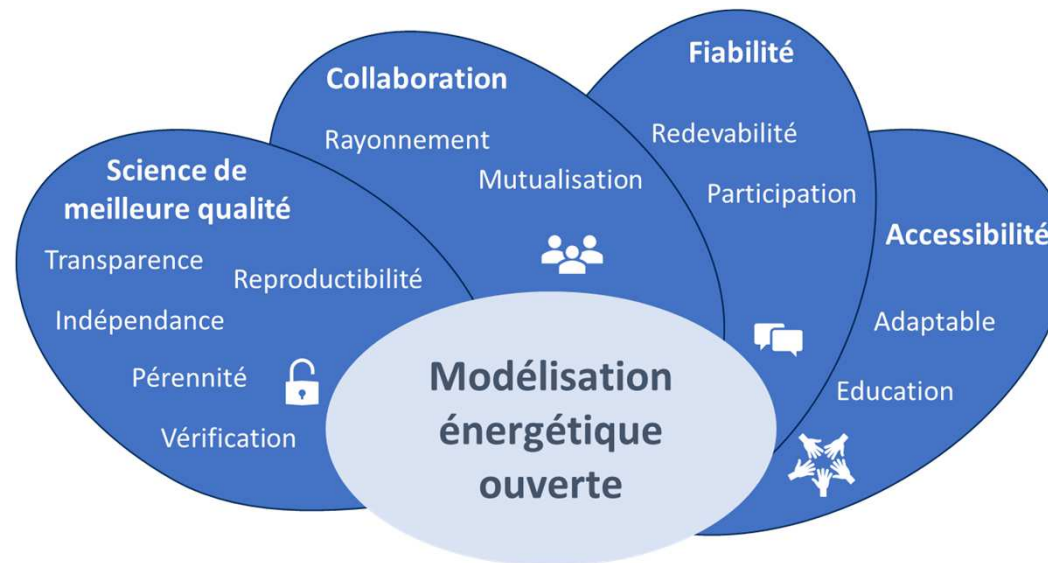


Objectifs supplémentaires :

- Capitaliser et diffuser les connaissances techniques, ainsi que les **parties prenantes et leurs contexte & objectifs**.
- Garder un **lien** avec les parties prenantes.

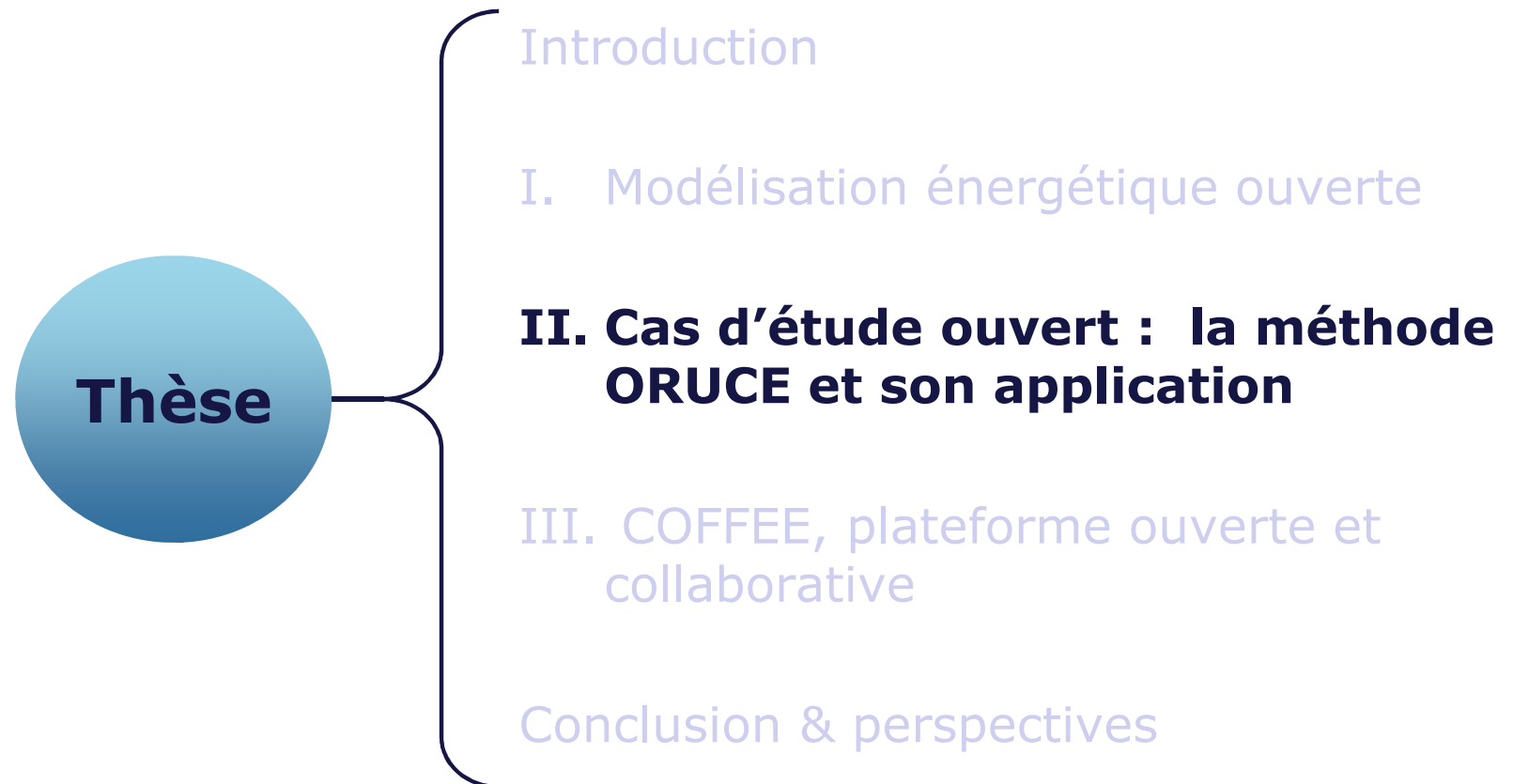
Bilan section I.

- **La modélisation énergétique ouverte apparaît pertinente & nécessaire pour faire face aux enjeux socio-écologiques**



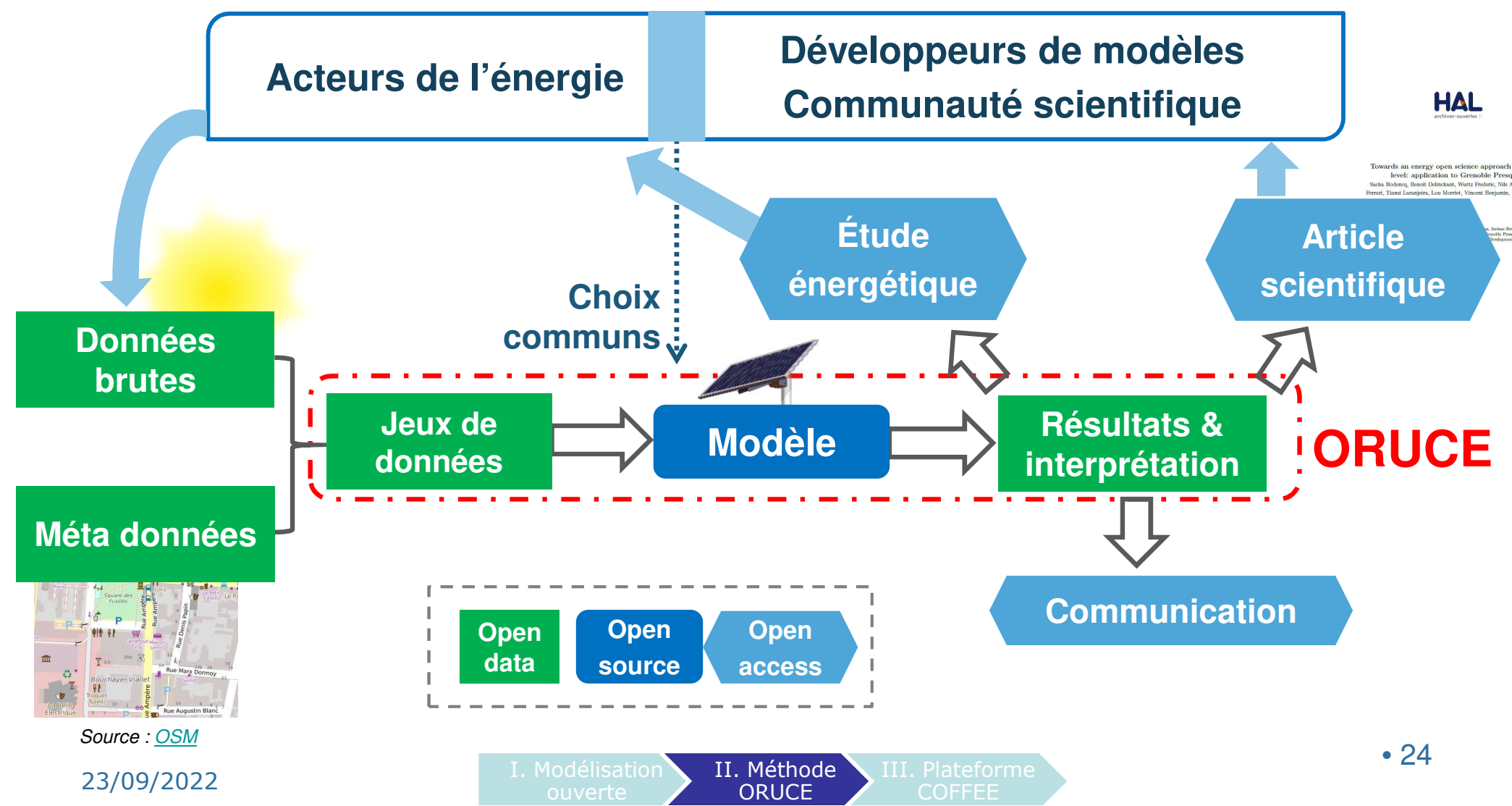
→ **Quelle méthode & outils pour la déployer en lien avec les parties prenantes ?**

La méthode ORUCE



La méthode ORUCE : principes

La méthode **ORUCE** (*Open and Reproducible Use Case for Energy*)



HAL
archives-ouvertes.fr

Towards an energy open science approach at district level: application to Grenoble Presqu'île
Sacha Holweg, David Dubouché, Wafa Fofani, Nils Krings, Jérôme Fomet, Tiansi Lanajira, Loïc Morlet, Vincent Benjamin, Delmy François

Arnaud Perret, et al., Towards an Energy Open Science Approach at District Level: Application to Grenoble Presqu'île, In International Conference on Smart Energy Systems, Mar 2023, Grenoble, France



Source : [OSM](https://www.openstreetmap.org/)

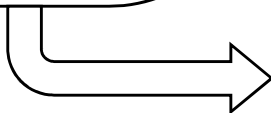
23/09/2022

Notebook : l'objet ORUCE

Jupyter notebooks

Outil de modélisation énergétique

Classes et fonctions



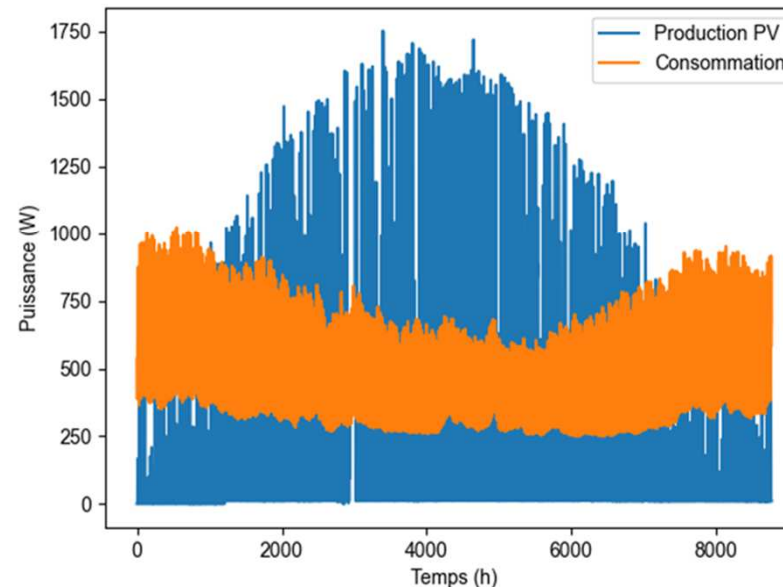
Tracé des puissances PV et consommation

La partie suivante permet d'afficher la puissance PV et la consommation annuelle

```
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')
```

Un exemple de production PV et consommation annuelle



Cellule
Markdown

Cellules
de code
(entrée)

Cellule
de code
(sortie)



NOTEBOOK ORUCE

A. Informations générales

B. Gestion de l'environnement

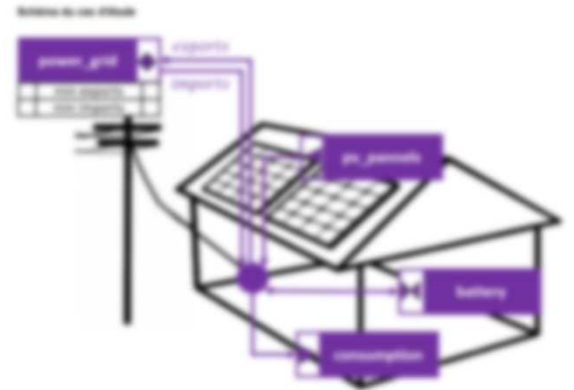
D. Présentation du modèle

C. Gestion des données

E. Modélisation

F. Affichage résultats

G. Fiche descriptive



La méthode ORUCE : bilan

Publication seule



Publication +



Code

Code & données

Code, données et notebook

ORUCE

Code, données, et notebook avec environnement d'exécution


- Comprendre
- Adapter
- Comparer

La méthode ORUCE : validation

ORUCE { = méthode évolutive
≠ standard

Validations sur critères de :

● **Transparence :**
Transparency Checklist [1]

● **Reproductibilité :**
Assemblage d'une grille de validation [2-8]

● **Collaboration & accessibilité :**
Enquête - Retours d'expériences



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

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]	Bonnes pratiques
Favoriser l'interopérabilité des modèles [93]	Pas exploré
Développer des tests pour les modèles avec des données ouvertes [93,294]	Bonnes pratique
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 incréments [293]	
Général	
Définir les objectifs et pratiques de reproductibilité dès le début du processus de recherche [295]	Bonnes pratiques
Utiliser l'existant, notamment les solutions ouvertes avec une large communauté [295]	Bonnes pratiques
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]	Bonnes pratiques
Fournir un document retraçant tout le processus de modélisation, par exemple un notebook [294,295]	
Résultats reproduits [291] (reproductibilité des résultats)	Perspectives d'usages
Résultats répliqués [291] (reproductibilité inférentielle)	Perspectives d'usages

Distinction d'applicatifs



ORUCE recherche



ORUCE médiation

Objectif

Transparence et reproductibilité

Pédagogie et médiation

Public

Communauté scientifique

Acteurs de l'énergie, étudiant·e·s

Autonomie ?



Applicatifs



ORUCE recherche



ORUCE médiation



Projet de valorisation de chaleur fatale d'un acteur électro-intensif



Autoconsommation photovoltaïque

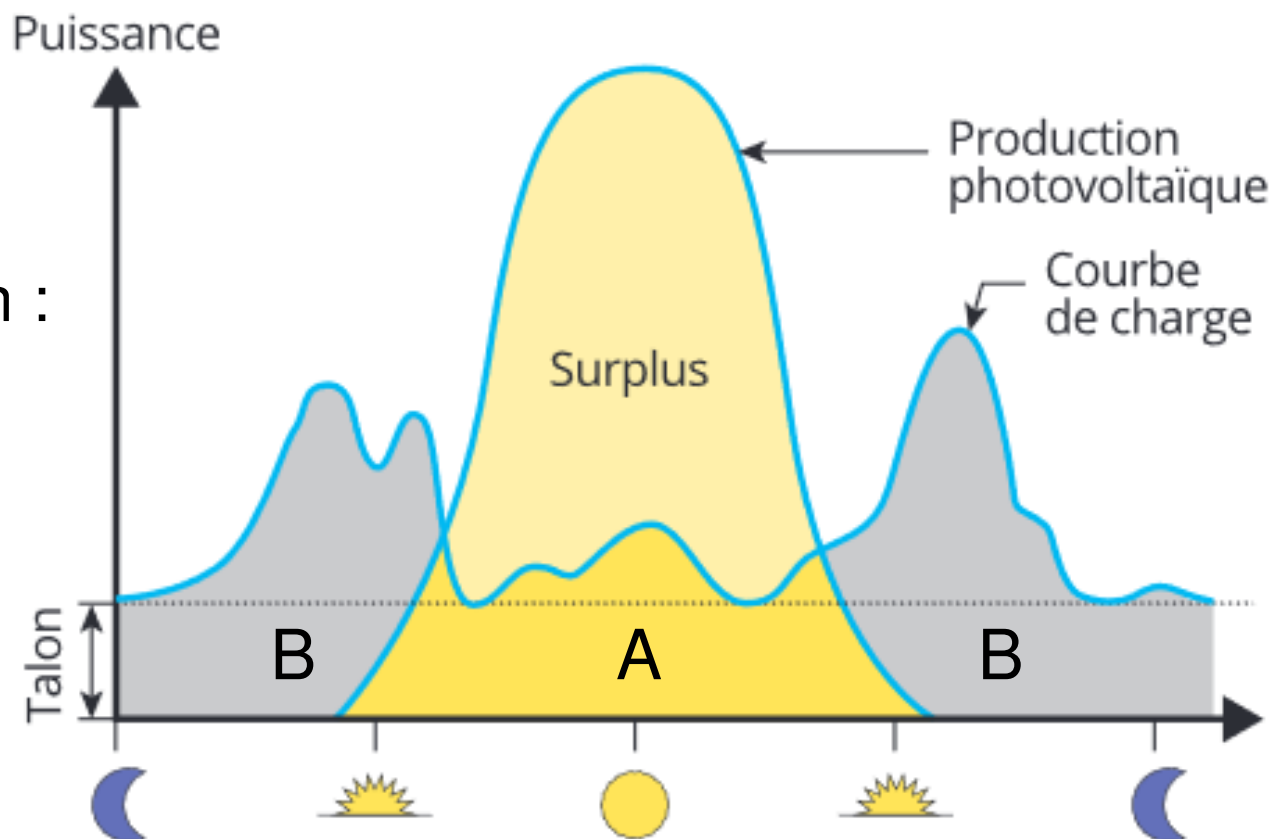


Autoconsommation PV : généralités

- **Autoconsommation PV** : utilisation de tout ou partie de l'électricité PV sur le lieu où elle est produite

Taux d'autoproduction :

$$\tau = \frac{A}{A + B}$$



Source : ADEME Occitanie, d'après l'illustration de © l'AQC, tous droits réservés

Autoconsommation PV : ORUCE recherche

Cycle de vie d'un panneau solaire photovoltaïque

Source : thèse Nouha Gazbour, 2019



 **ORUCE recherche**

→ Arbitrage entre impact environnemental & autonomie énergétique

Autoconsommation PV : ORUCE recherche

Autoconsommation d'un foyer raccordé au réseau, avec PV + batteries

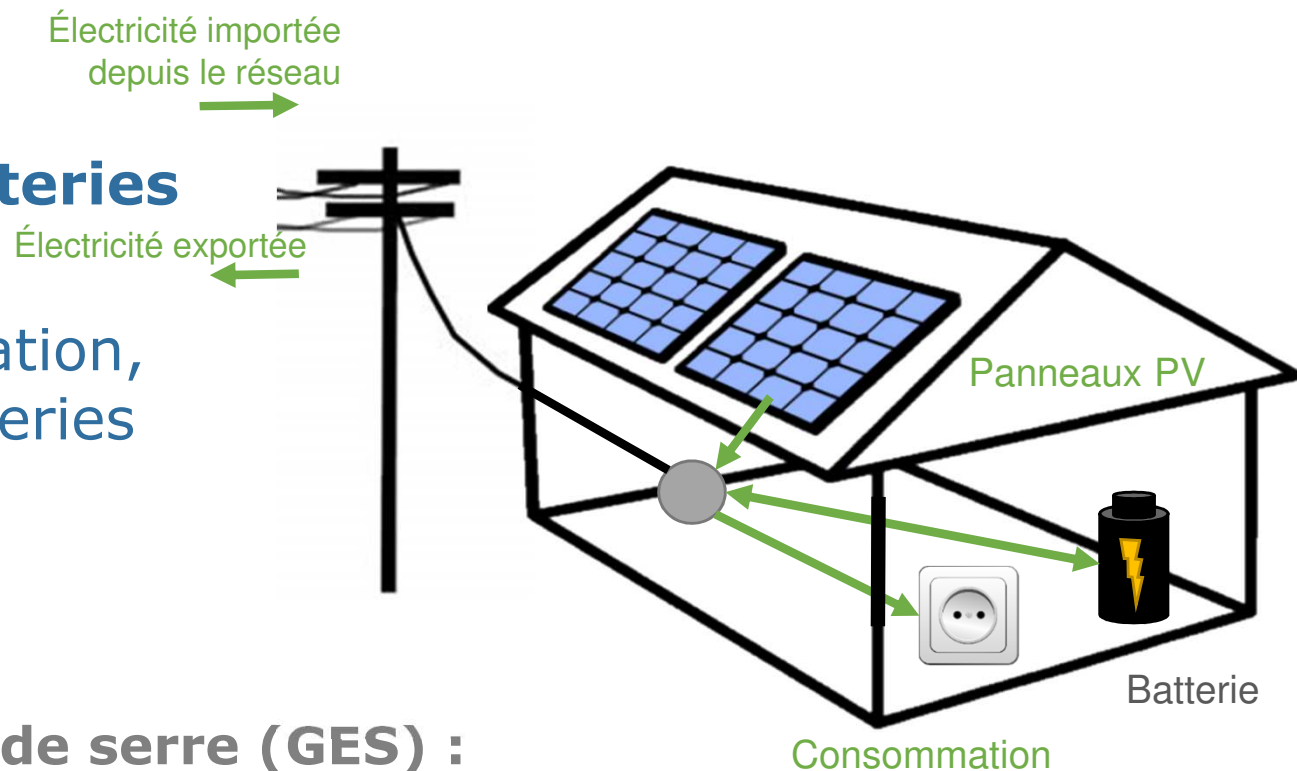
Variables : Surface, orientation, inclinaison PV, capacité batteries

Double objectif :

- Taux d'autoproduction

- Emissions de gaz à effet de serre (GES) :

$$em_{tot} = \underbrace{GWP_{PV} * P_{peak_{PV}} + GWP_{bat} * capa_{bat}}_{\text{Coût fixe}} + \underbrace{\sum_{horizon} P_{load}[t] * GHG_{grid}[t]}_{\text{Coût variable}}$$



Equivalent GES :

Coût fixe

Coût variable

Autoconsommation PV : ORUCE recherche



Enedis, ENSE3, ADEME

Chercheurs G2Elab,
communauté génie électrique



Serveur cas
d'étude G2Elab

➤ GES
➤ $\tau = \frac{A}{A+B}$



Article
SGE

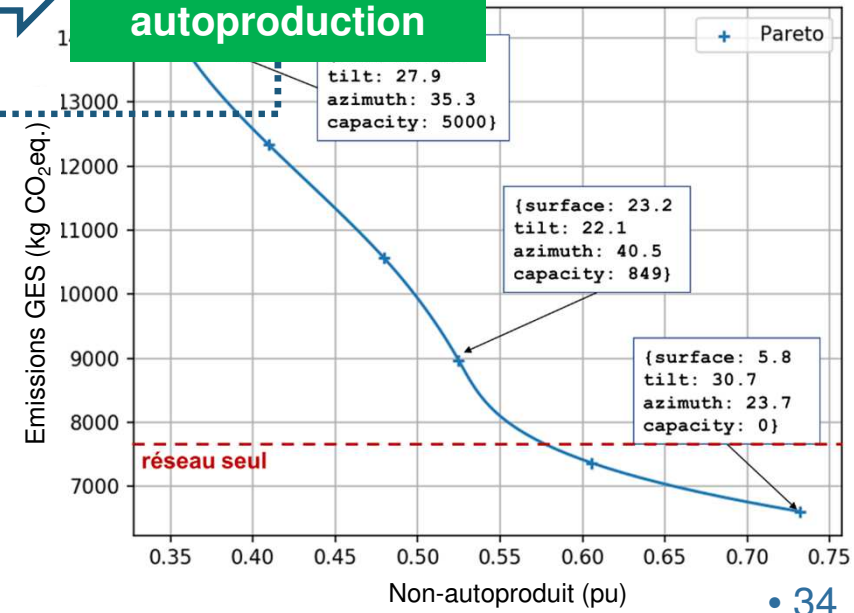
Données de
consommation,
ensoleillement,
émissions GES

Jeux de
données

Modèle NoLOAD

Pareto GES vs
autoproduction

Métadonnées OEM



Titre	
Description	Données d'irradiance à Grenoble comprenant le DHI et DNI
Date de publication	2020
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
Format	.csv
Source	https://mhi-srv.g2elab.grenoble-inp.fr/django/API/
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

23/09/2022



Autoconsommation PV : ORUCE médiation



ORUCE médiation

→ **Objet pédagogique auprès
d'étudiants architectes ENSAG**

- ORUCE bien accueillie
- Forme : préférence interface
- Notebook adapté au public, non-autonomie



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

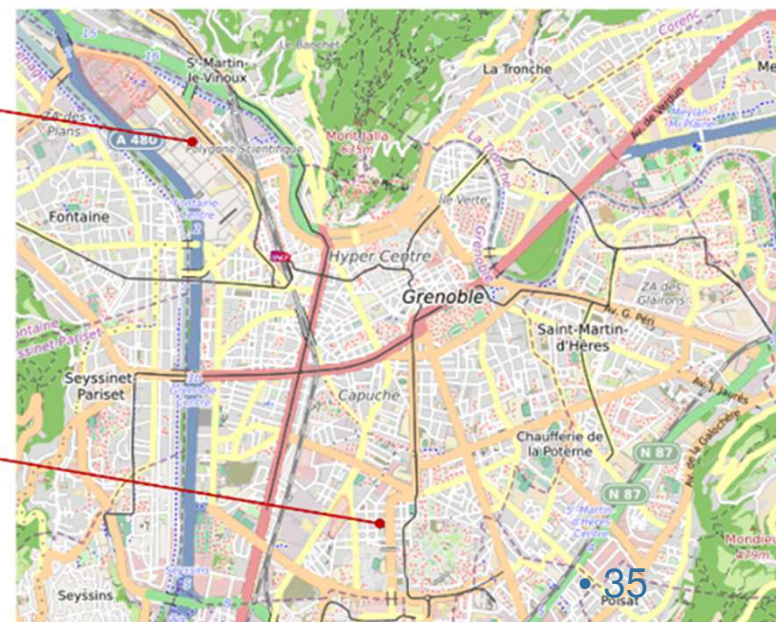
Il est important d'être transparent sur les hypothèses de modélisation qui ont été faites, ainsi que sur les données d'entrée et leur provenance. Cela afin de bien comprendre les résultats que l'on obtiendra, mais aussi leurs limites.

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.

GreEn-ER

ENSAG



Autoconsommation PV : ORUCE médiation



ORUCE médiation



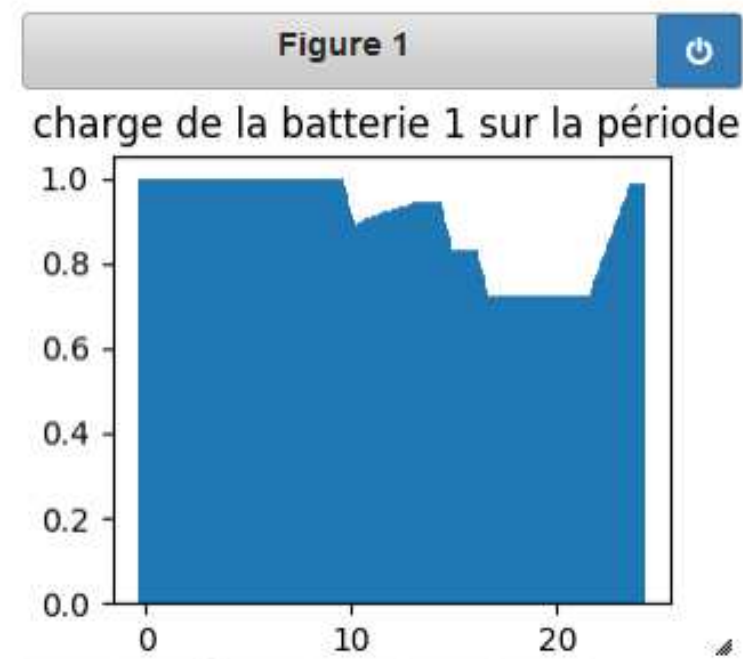
→ Exploration de scénarios d'autonomie
ONIRI 2070



. Crédit : Arno Villenave, Organic Orchestra, tous droits réservés



--- OPTIMISATION RESULTS ---



Bilan ORUCE & cas d'étude

ORUCE

&



**Autoconsommation
photovoltaïque**

**Projet de valorisation de
chaleur fatale du LNCMI**

**Partage et
collaborations
transdisciplinaires**

Accessibilité d'usage

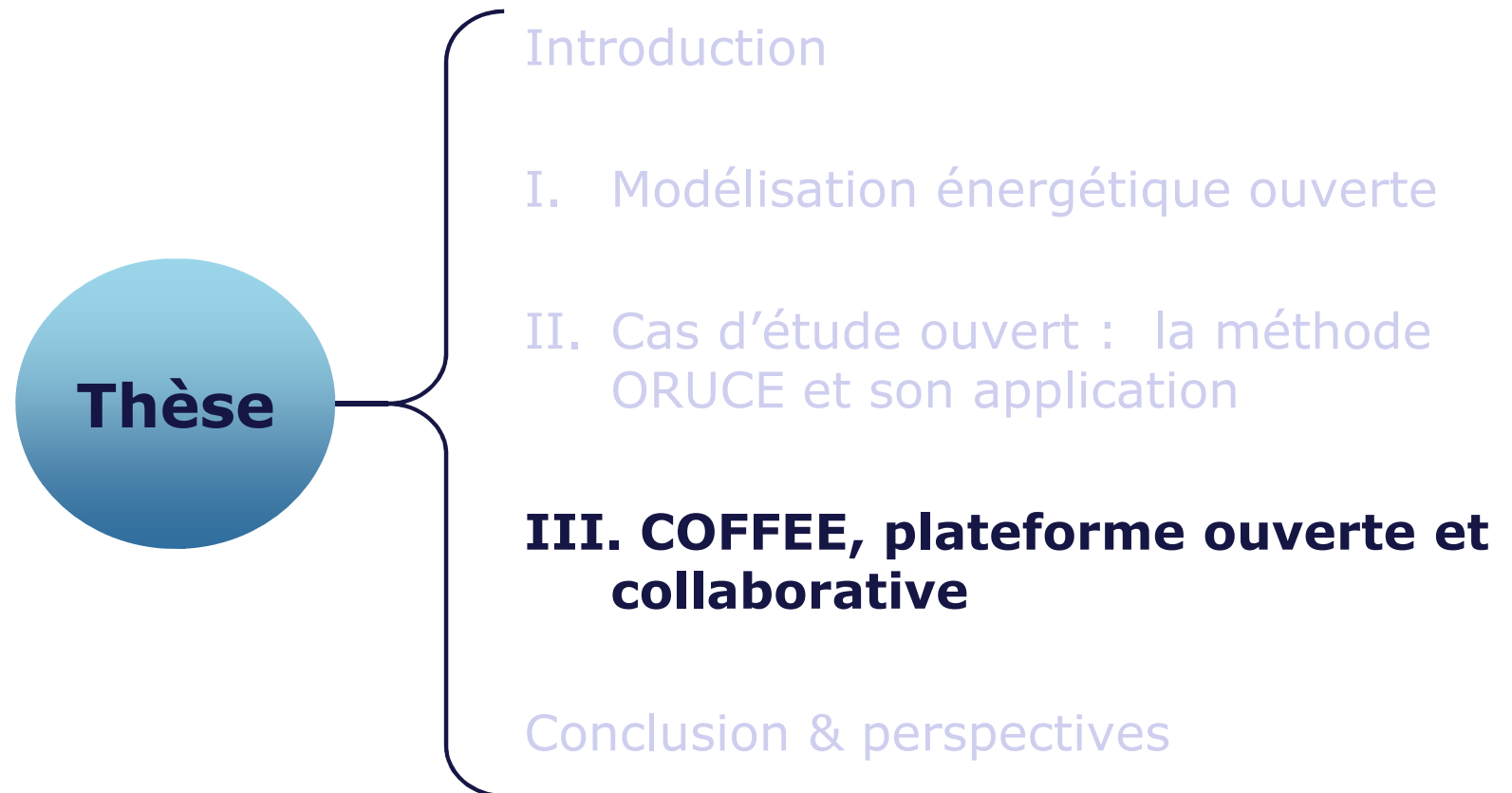
**Temps et supports
d'échanges
complémentaires**

**Transparence
nouvelle**

**Processus rigoureux,
gratifiant**

**Changement de
paradigme**

COFFEE



Au-delà des cas d'étude

Pour une multitude de cas d'étude...

- Comment favoriser l'**accessibilité** et la **capacité à débattre** ?
- Comment rendre les connaissances liées à la modélisation énergétique ouverte **utilisables, utiles & utilisées** ?

→ Plateformes ouvertes & collaboratives

- Coopérer, partager des idées et des expériences
- Plusieurs existent dans le domaine énergétique
- Caractéristiques

Base de données
Outil de modélisation
Service web
Création de lien

Manques :

- Échelle locale
- Lien aux utilisateurs
- Ensemblier

La plateforme COFFEE

COFFEE : Collaborative Open Framework For Energy Engineering
 → Relier **communautés** & **fonctionnalités**

Profils visés



Recherche **Collectifs citoyens**
BE & autorités publiques

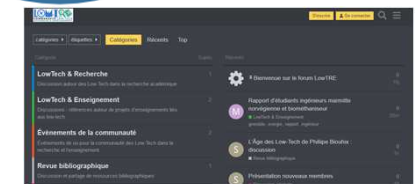
Bibliothèque de cas d'étude
 Un espace de collaboration et d'échanges

Forum
 Lieu de socialisation

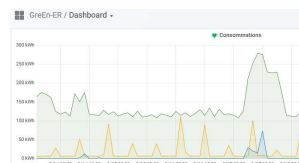
Open Data
 Accès et observation de données

Open Source
 Code et documentation

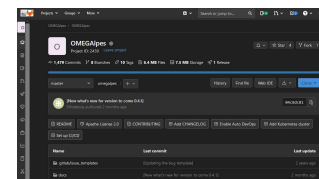
Open Access
 Articles et résultats scientifiques



Forum LowTRE



Grafana



OMEGAAlpes, NoLOAD



HAL G2Elab

Pictures: Canva, Free Media License

Enquête CAUTIC

- **Enquête CAUTIC** : méthode qualitative basée sur l'expérience utilisateur, explorant les critères de signification d'usage. 20 critères / 4 catégories
 - Banalisation : *comment est-ce que ça fonctionne ?*
 - Hybridation : *qu'est-ce que ça fait ?*
 - Identité active : *à qui cela s'adresse ?*
 - Intégration : *comment ça s'intègre dans l'environnement social ?*

- 15 (+2) interviews avec des acteurs de l'énergie

Recherche

4

Autorités publiques – Bureaux d'étude

3

3

Collectifs citoyens

5

Résultats d'enquête CAUTIC

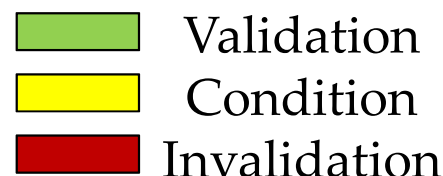
Niveaux et critères	Tendance
1. Savoir-faire	
1.1. Compréhensible	
1.2. Simple d'utilisation	
1.3. Raccroché à l'existant	
1.4. Choix fonctions facile	
1.5. Envisageable	
2. Pratiques	
2.1. Intérêt	
2.2. Complète l'existant	
2.3. Comparaison	
2.4. Résolution	
2.5. Nouvelle organisation	
3. Identité	
3.1. Cible comprise	
3.2. Agir sur son rôle	
3.3. Compatible	
3.4. Imaginer usage	
3.5. Imaginer extension	
4. Environnement	
4.1. Évolution en phase	
4.2. Adapté aux relations	
4.3. Adapté à la place	
4.4. Adapté à l'organisation	

■ Peu de barrières d'adoption

- La bibliothèque de cas d'étude apparaît comme pertinente
- Répond à un besoin de transparence

■ ... mais sujet à conditions

- Duplication potentielle avec l'existant
- Besoin de ressource humaine pour l'animation

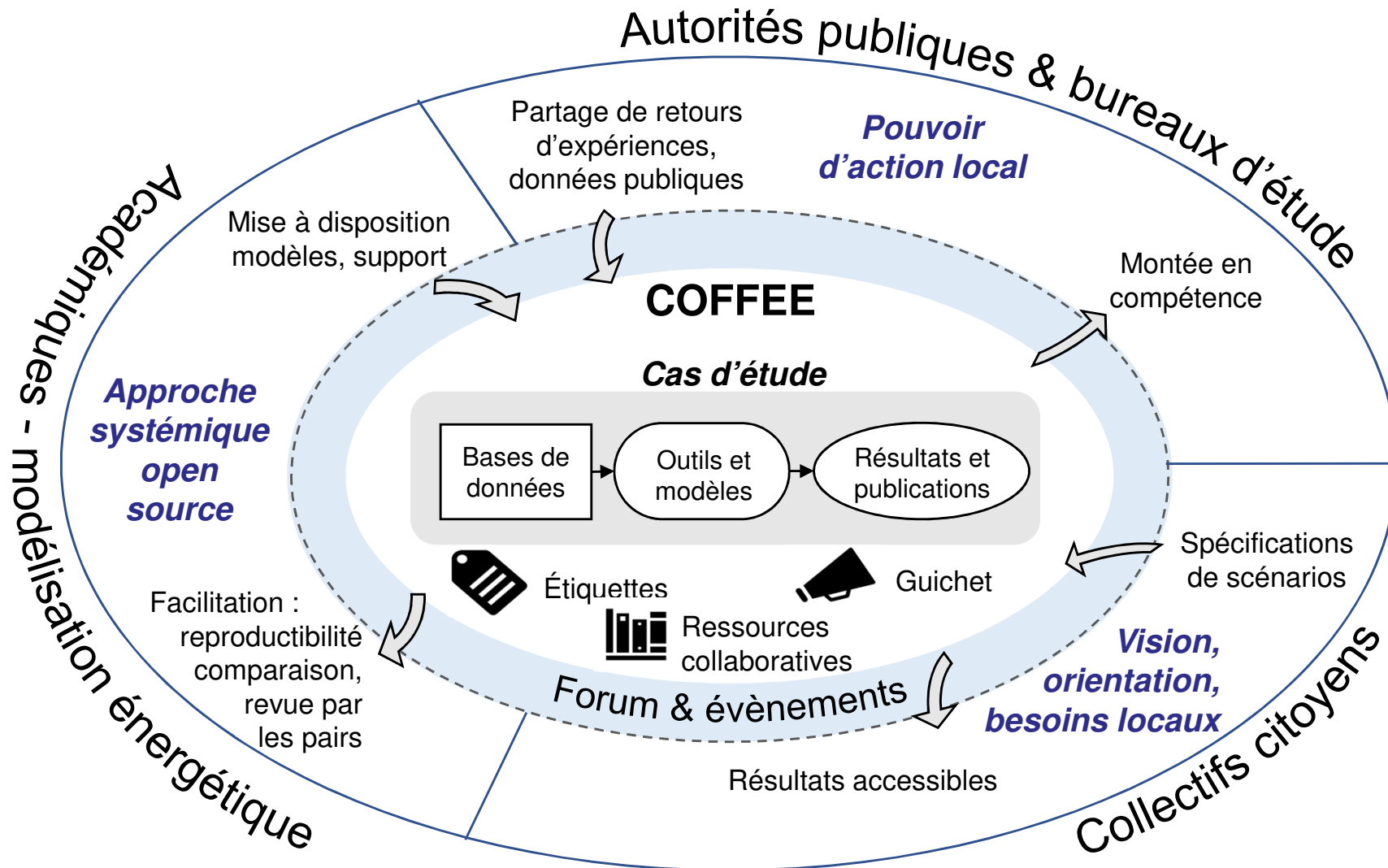


Résultats d'enquête CAUTIC

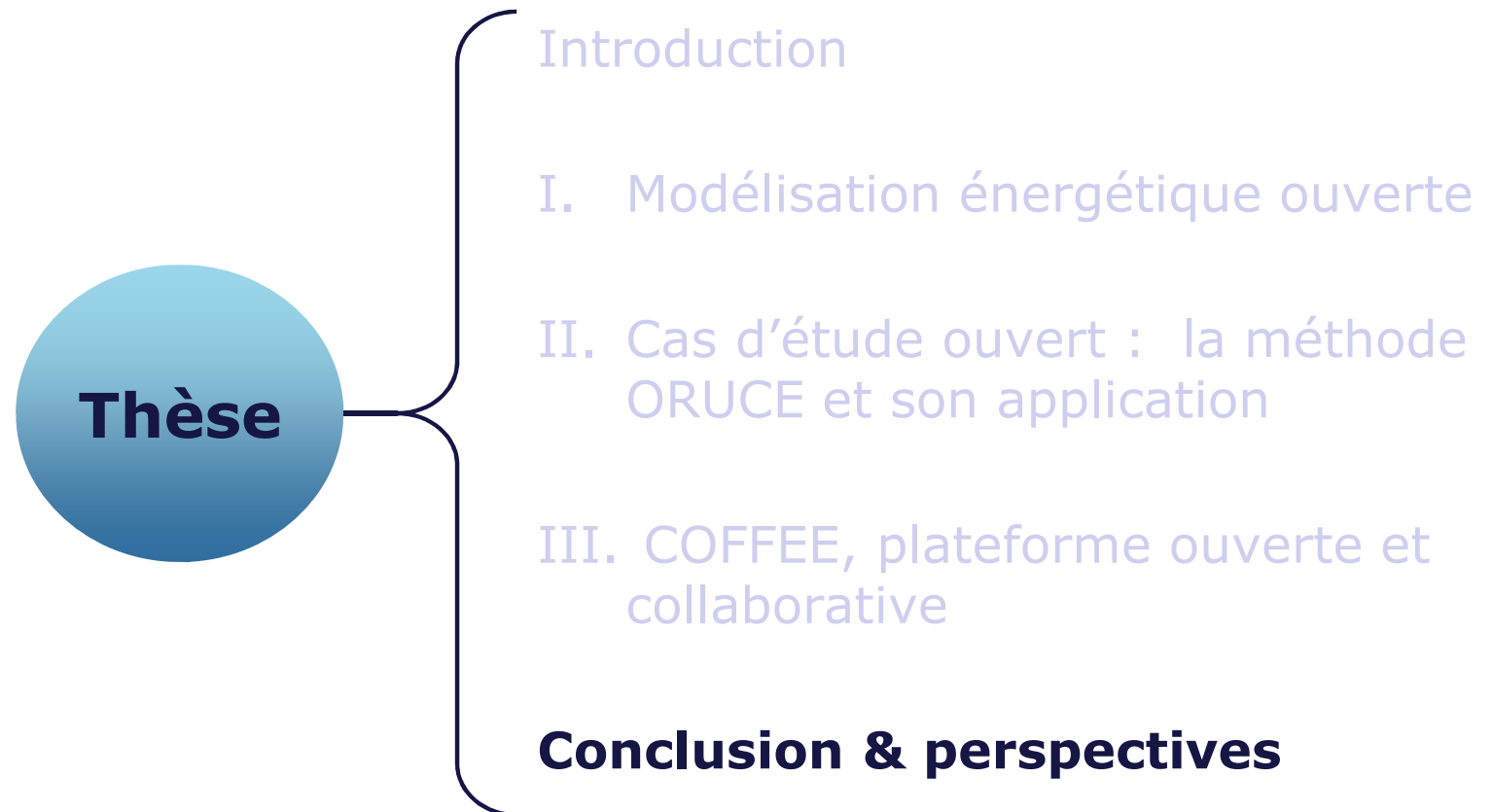
Recommandations

1. Clarifier le rôle **ensemblier** de COFFEE
2. Positionner COFFEE dans une dynamique de **science ouverte** pour les acteurs de la transition énergétique
3. Renforcer la lisibilité de COFFEE en termes de **modèle économique**
4. Libérer le gisement de **ressources**
5. Organiser les **données**
6. Proposer une **vérification et certification** des données fournies
7. **Animer** le réseau COFFEE
8. Clarifier le **positionnement** entre solutions matures et innovantes
9. Accompagner la **montée en compétences**
10. Accompagner la relation **entre métropoles et petites collectivités**
11. Équilibrer les **ressources socio-économiques et techniques**
12. Mettre en place un **moteur de recherche spécifique** et une **ressource humaine**

Bilan COFFEE



Conclusion & perspectives



Conclusion

- **Pourquoi** développer une modélisation énergétique ouverte ? Et pourquoi n'est-elle pas la norme ?
- **Comment** en développer les pratiques pour atteindre des objectifs de transparence, de collaboration et de reproductibilité ?
- Comment **valider** la pertinence de ces nouvelles pratiques ?

Conclusion

■ Pourquoi ? → Faire face aux enjeux socio-écologiques

- Qualité via la transparence et reproductibilité
- Position réflexive
- Devoir de fiabilité & d'accessibilité

■ Comment ? → Ouvert par défaut

- Acculturation, ouverture des processus
- Applications concrètes
- Mise en réseau

ORUCE
LNCMI, Autoconsommation
COFFEE & enquête

■ Valider ? → Retours d'expériences & analyses

- Enquêtes qualitatives & quantitatives

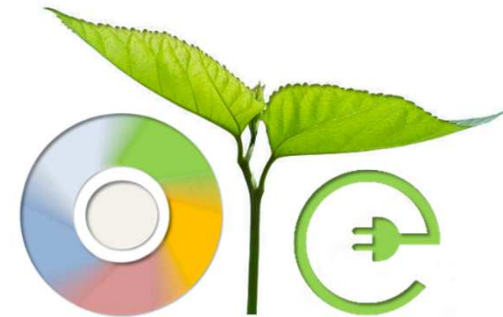
Perspectives

- **Au-delà de cas d'étude ouverts et reproductibles**

→ Participation

- **Pérennité de COFFEE**

→ Usage & soutenabilité



Observatoire de la Transition Energétique

- **Matérialité de la Science Ouverte**

→ Boutique des Science & Low-Tech

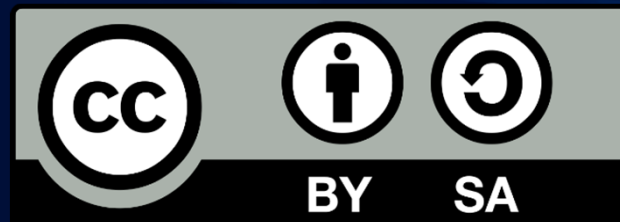


Sources

Intégralité des sources dans le manuscrit de thèse

- [1] 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.
- [2] DeCarolis JF, Hunter K, Sreepathi S. The case for repeatable analysis with energy economy optimization models. *Energy Economics*. 2012;34:1845-53.
- [3] 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>
- [4] Courtès L. Reproduire les environnements logiciels : un maillon incontournable de la recherche reproductible. 1024 : Bulletin de la Société Informatique de France. 2021;15.
- [5] Sandve GK, Nekrutenko A, Taylor J, Hovig E. Ten Simple Rules for Reproducible Computational Research. *PLOS Computational Biology*. 2013;9:e1003285.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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>

Merci pour votre attention et vos retours



Licence

Except where otherwise noted, this work and its contents (texts and illustrations) are licensed under the Attribution 4.0 International ([CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/))

Please quote as: “Soutenance de these - Méthodes et outils pour un processus de modélisation collaboratif et ouvert des systèmes énergétiques” 2022 © Sacha Hodencq, [G2E Lab](https://g2elab.com/) | [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)