

---

## benchmarking stratégique des capacités expérimentales du laboratoire Jaques Geelen et positionnement international

**Auteur :** Latreche, Mohamed

**Promoteur(s) :** Andre, Philippe; 2770

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2025-2026

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/25139>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement**

**UNI.LU – Faculty of Science, Technology and Medicine**

## **BENCHMARKING STRATEGIQUE DES CAPACITES EXPERIMENTALES DU LABORATOIRE JAQUES GEELLEN ET POSITIONNEMENT INTERNATIONAL**



**MOHAMED LATRECHE**

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLOMES DE**

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, A FINALITE SPECIALISEE (ULIEGE)**

**MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FILIERE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)**

**ANNEE ACADEMIQUE 2025-2026**

**REDIGE SOUS LA DIRECTION DE PHILIPPE ANDRÉ ET FRANK SCHOLZEN (CO-PROMOTEUR)**

**COMITE DE LECTURE :  
ELISABETH DAVIN  
FRANK SCHOLZEN  
PAULINE ABRAHAMS**

Copyright :

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

L'autorité académique est représentée par les promoteurs membres du personnel enseignant de l'ULiège et de l'Université du Luxembourg.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : LATRECHE Mohamed | [mlatreche3@gmail.com](mailto:mlatreche3@gmail.com)



# Remerciements

Ce travail de fin d'études marque l'aboutissement de mon cursus académique. Une page se tourne et laisse place au commencement d'un nouveau chapitre. Cependant, sa réalisation n'aurait pas été possible sans le soutien, les conseils et la confiance de nombreuses personnes à qui je tiens à adresser mes remerciements ici.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur officiel, Monsieur Philippe ANDRÉ, pour m'avoir offert cette chance de réaliser mon stage au sein de l'équipe de recherche BEMS au sein même du campus Environnement d'Arlon, et pour m'avoir proposé ce sujet de TFE. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'accueillant à ses côtés et pour avoir rendu cette expérience possible.

Je souhaite adresser une reconnaissance toute particulière à Madame Elisabeth DAVIN, mon encadrante pédagogique durant mon stage et mon TFE. Je la remercie chaleureusement pour son suivi rigoureux tout au long de ce travail, pour sa grande disponibilité et pour ses conseils avisés qui ont été plus que déterminants dans la réussite de cette recherche.

Mes remerciements s'étendent également à l'équipe BEMS dans son entièreté au sein du Campus d'Arlon pour leur accueil et l'environnement de travail stimulant qu'ils m'ont offert.

Je n'oublie pas l'Université de Liège, et l'ensemble du corps professoral et du personnel qui, par leur enseignement et leur accompagnement, ont contribué à mon parcours et m'ont permis d'atteindre cette étape finale.

Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils porteront à ce travail et pour la lecture attentive qu'ils en feront.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes proches pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements durant ces quelques mois de travail.

# Table des matières

Remerciements.....	4
Table des matières .....	5
Liste des abréviations .....	7
Liste des figures .....	9
Liste des tableaux .....	10
I. Introduction : Le Laboratoire Jacques Geelen face au défi de la réalité .....	11
II. Les enjeux de la performance énergétique réelle : Du "Performance Gap" à l'approche dynamique .....	14
1. De la simulation à la réalité : le constat de l'écart de performance (le "gap").....	14
2. La physique du bâtiment moderne : pourquoi l'approche statique est obsolète	16
3. La Nécessité de l'Échelle Réelle (Full-Scale) : Justification Scientifique .....	17
III. État de l'art des infrastructures expérimentales à l'échelle réelle : Typologies et standardisation .....	20
1. Classification des Infrastructures (selon l'Annexe 58) .....	20
2. Les Standards Méthodologiques : Protocoles de Mesure Reconnus.....	22
3. Cartographie des Acteurs Majeurs (2015-2025) .....	24
IV. Dynamiques d'évolution et modèles de gestion des infrastructures de recherche	27
1. Évolution Technologique des Laboratoires : L'Intégration du "Smart".....	27
2. Modèles Économiques et Stratégiques .....	28
3. Les Indicateurs de Compétitivité (KPIs).....	29
V. Démarche méthodologique : Du standard technique à l'indicateur stratégique....	31
1. Opérationnalisation de la recherche.....	31
2. Constitution du panel de référence : Sélection par homogénéité typologique...	32
3. La matrice de traduction : Du critère technique à la dimension stratégique .....	33
4. Système de notation pour l'analyse comparative .....	35
5. Protocole de collecte et limites méthodologiques .....	36
VI. Analyse multidimensionnelle du LJG .....	38
1. Cartographie des forces en présence et positionnement concurrentiel.....	38
2. Dimension 1 : Agilité et flexibilité infrastructurelle .....	42
3. Dimension 2 : Maitrise environnementale .....	46

4.	Dimension 3 : Maturité Cyber-Physique .....	51
5.	Dimension 4 : Rayonnement et productivité scientifique.....	55
6.	Dimension 5 : Trajectoire et Résilience .....	58
VII.	Positionnement et diagnostic stratégique .....	62
1.	Synthèse comparative globale : Matrice de scoring.....	62
2.	Signature morphologique .....	64
3.	Synthèse stratégique SWOT .....	67
4.	Conclusion.....	70
VIII.	Discussion et recommandations stratégiques à l'horizon 2030.....	72
1.	« Smart Retrofit Living Lab » .....	72
2.	Plan d'Investissement Priorisé .....	73
3.	Feuille de Route Opérationnelle 2025-2030 .....	73
4.	Limites et Risques.....	75
IX.	Conclusion.....	77
X.	Bibliographie.....	79

# Liste des abréviations

AIE (IEA) : Agence Internationale de l'Énergie (International Energy Agency)

BEMS : Building Energy and Modelling Systems (Équipe de recherche ULiège)

BIM : Building Information Modeling

CAPEX : Capital Expenditure (Dépenses d'investissement)

CFD : Computational Fluid Dynamics (Mécanique des fluides numérique)

CVC (HVAC) : Chauffage, Ventilation et Climatisation

EBC : Energy in Buildings and Communities (Programme de l'AIE)

ECS : Eau Chaude Sanitaire

FEDER : Fonds Européen de Développement Régional

GTB : Gestion Technique du Bâtiment

HIL : Hardware-in-the-Loop (Simulation hybride réel-virtuel)

HTC / HLC : Heat Transfer Coefficient / Heat Loss Coefficient

IFS : Indice de Flexibilité Structurelle (Indicateur créé pour l'étude)

IMCP : Indice de Maturité Cyber-Physique (Indicateur créé pour l'étude)

IME : Indice de Maîtrise Environnementale (Indicateur créé pour l'étude)

IoT : Internet of Things (Internet des Objets)

IRS : Indice de Rayonnement Scientifique (Indicateur créé pour l'étude)

ISO : Organisation internationale de normalisation

ITR : Indice de Trajectoire et Résilience (Indicateur créé pour l'étude)

KPI : Key Performance Indicator (Indicateur clé de performance)

LJG : Laboratoire Jacques Geelen

MPC : Model Predictive Control (Commande prédictive)

NZEB : Nearly Zero Energy Building

PAC : Pompe à Chaleur

PV : Photovoltaïque

QUB : Quick U-value of Buildings (Méthode de mesure)

V2G : Vehicle-to-Grid (Interaction véhicule-réseau)

ZEB : Zero Energy Building

# Liste des figures

Figure 1 : Matrice de positionnement du LJG.....	38
Figure 2 : Carte de répartition des infrastructures et zones climatiques .....	41
Figure 4 : Diagramme de Sankey des flux énergétiques du LJG. Illustration de la flexibilité systémique : multitude de sources (Géothermie, PV, Gaz) connectables aux différents vecteurs de stockage et de distribution. ....	45
Figure 5 : Analyse de la densité métrologique comparée (Volume vs Instrumentation). 50	
Figure 6 : Schéma de principe de l'hybridation Hardware-in-the-Loop (HIL) au LJG. ....	52
Figure 7 : Architecture Cyber-Physique actuelle du LJG .....	54
Figure 8 : La Carte des Partenariats Stratégiques .....	58
Figure 9 : Diagramme Radar comparatif (LJG vs Moyenne vs Leaders).....	65
Figure 10 : Roadmap stratégique pour le LJG à l'horizon 2025-2030 .....	75

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des infrstructures majeures .....	26
Tableau 2 : Matrice de traduction des données en indicateurs .....	34
Tableau 3 : Échelle de notation de la compétitivité .....	36
Tableau 4 : Spécifications techniques comparées .....	41
Tableau 5 : Grille de définition des scores par dimension.....	62
Tableau 6 : Matrice de Scoring des 9 Infrastructures.....	63
Tableau 7 : Matrice SWOT du Laboratoire Jacques Geelen .....	68

# I. Introduction : Le Laboratoire Jacques Geelen face au défi de la réalité

Le secteur du bâtiment représente une part importante de la consommation énergétique globale ainsi que des émissions de gaz à effet de serre associées. Dans un contexte marqué par la transition énergétique, la raréfaction des ressources et la lutte contre le changement climatique, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments constitue un enjeu majeur, à l'échelle européenne et internationale. Au cours des dernières décennies, de nombreux progrès ont été réalisés en matière de conception énergétique, notamment grâce au développement d'outils de simulation, à l'intégration de systèmes énergétiques plus performants et à l'utilisation croissante des énergies renouvelables. Toutefois, malgré ces avancées, la performance réelle des bâtiments en conditions d'exploitation ne correspond pas toujours aux performances théoriques estimées lors des phases de conception.

L'écart fréquemment observé entre les performances énergétiques calculées et celles mesurées en conditions réelles, communément désigné sous le terme de « performance gap », met en évidence les limites des approches exclusivement basées sur la modélisation et la simulation. Cet écart peut s'expliquer par de nombreux facteurs, tels que la complexité des systèmes énergétiques, les interactions entre les composants du bâtiment, les conditions climatiques réelles ou encore les usages et comportements des occupants. Face à ces limites, la nécessité de disposer de données expérimentales fiables, issues de mesures dynamiques en conditions représentatives, apparaît essentielle afin de mieux comprendre le comportement énergétique réel des bâtiments et d'améliorer la pertinence des modèles utilisés.

Dans ce contexte, les laboratoires expérimentaux dédiés à l'étude de la performance énergétique des bâtiments jouent un rôle central. Ces infrastructures permettent de réaliser des expérimentations à échelle réelle ou semi-réelle, en combinant mesures physiques, instrumentation avancée et outils de simulation numérique. Le laboratoire Jacques Geelen, intégré à l'équipe BEMS (Building Energy and Modelling Systems), s'inscrit pleinement dans cette démarche. Il est spécialisé dans l'analyse expérimentale des systèmes énergétiques du bâtiment, à travers des mesures dynamiques, des dispositifs fortement instrumentés et des approches de simulation et d'expérimentation couplées. Le laboratoire constitue ainsi un outil clé pour l'étude, la

validation et l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments et de leurs systèmes.

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre d'un stage académique et vise à analyser le positionnement actuel du laboratoire Jacques Geelen par rapport à d'autres infrastructures expérimentales similaires, en Europe et en Amérique du Nord. Il gravite donc autour de la question suivante : « *Comment le laboratoire Jacques Geelen se positionne-t-il aujourd'hui par rapport aux principales infrastructures expérimentales dédiées aux mesures dynamiques en vraie grandeur, et quelles recommandations peuvent être formulées afin de renforcer ses capacités expérimentales et sa compétitivité scientifique ?* ». Afin d'y répondre, une démarche de benchmarking stratégique est mise en œuvre, reposant sur une analyse comparative des caractéristiques, des équipements, des méthodes et des axes de recherche de différentes plateformes expérimentales, en plaçant le laboratoire Jacques Geelen au centre de l'analyse.

L'objectif principal est donc de positionner le laboratoire Jacques Geelen par rapport à d'autres infrastructures expérimentales similaires, situées en Europe et en Amérique du Nord, à travers cette démarche de benchmarking. Ce positionnement vise à évaluer le niveau de maturité et les spécificités du laboratoire dans le domaine des mesures dynamiques en vraie grandeur appliquées aux bâtiments. Cependant, au-delà de cette analyse comparative technique, ce positionnement vise aussi à évaluer le potentiel stratégique du laboratoire. L'objectif est de dépasser le simple inventaire matériel pour établir un diagnostic de compétitivité. Il s'agit de déterminer si l'infrastructure, conçue au début des années 2000, dispose des leviers nécessaires pour répondre aux nouveaux impératifs de la transition énergétique (flexibilité, réseaux intelligents, rénovation) ou si elle nécessite une mise à niveau technologique majeure pour rester pertinente à l'horizon 2030.

Ce travail a pour ambition de fournir une analyse structurée et comparative des infrastructures expérimentales étudiées, tout en proposant des éléments concrets d'aide à la décision pour l'orientation future des activités de recherche du laboratoire Jacques Geelen. Il vise également à contribuer, à l'échelle académique, à une meilleure compréhension des pratiques actuelles en matière de caractérisation expérimentale de la performance énergétique des bâtiments.

Ce mémoire s'articule autour de sept chapitres, structurés selon une logique progressive allant du constat général à la recommandation spécifique. Le premier chapitre (cette introduction) pose le cadre de la recherche. Le deuxième chapitre contextualise l'enjeu scientifique en détaillant la problématique de l'écart de performance énergétique et la nécessité impérieuse de mesures dynamiques pour le combler. Le troisième chapitre dresse une vue d'ensemble des infrastructures expérimentales, en s'appuyant sur la typologie de l'Annexe 58 de l'AIE pour situer le Laboratoire Jacques Geelen dans le paysage international.

Le quatrième chapitre explore les dynamiques d'évolution des laboratoires de recherche, mettant en lumière les nouveaux standards technologiques et économiques. Cette analyse théorique fonde la démarche méthodologique présentée au cinquième chapitre, où est définie la grille d'analyse multidimensionnelle utilisée pour l'audit. Le cœur du travail réside dans les sixième et septième chapitres, qui livrent l'analyse comparative détaillée (le Benchmarking). Ils confrontent le Laboratoire Jacques Geelen à un panel de huit infrastructures de référence européennes et nord-américaines, révélant ses forces méthodologiques et ses faiblesses structurelles à travers une analyse morphologique et stratégique. Enfin, le huitième chapitre synthétise ces résultats pour formuler un diagnostic stratégique et proposer une feuille de route opérationnelle à l'horizon 2030, visant à transformer le laboratoire en un « Smart & Hybrid Living Lab » dédié à la rénovation intelligente.

## II. Les enjeux de la performance énergétique réelle : Du "Performance Gap" à l'approche dynamique

La transition vers des bâtiments à haute performance énergétique a révélé les limites des outils de conception traditionnels. L'incertitude ne réside plus seulement dans la qualité de l'isolation, mais dans la compréhension systémique des interactions entre l'enveloppe, les systèmes actifs et les occupants.

### 1. De la simulation à la réalité : le constat de l'écart de performance (le "gap")

L'écart de performance énergétique (EPE) n'est pas une simple erreur de mesure ; c'est un phénomène systémique documenté par une littérature abondante sur la période 2015-2025. Il représente la différence entre l'efficacité énergétique prévue (conception/réglementation) et l'énergie réellement consommée par le bâtiment en service.

#### 1. Quantification et Magnitude de l'Écart

Les recherches ont permis de quantifier cet écart avec une précision inquiétante. Une méta-analyse couvrant 62 bâtiments d'étude a révélé un écart énergétique réglementaire moyen de +34 %, avec un écart-type considérable de 55 % (van Dronkelaar et al., 2016). Cela signifie que, statistiquement, un bâtiment certifié "basse consommation" risque de consommer un tiers d'énergie en plus que ce que promettent ses documents de conformité. Dans certains cas extrêmes, notamment pour les bâtiments à très haute performance où les besoins théoriques sont très faibles, l'écart relatif peut atteindre des facteurs de 2 à 3, voire plus (Stamp et al., 2017).

Il est important de distinguer les différentes strates de cet écart :

- L'écart réglementaire : La différence entre le calcul de conformité (basé sur des scénarios conventionnels d'occupation et de météo) et la réalité. Ce calcul n'a pas vocation à prédire la consommation réelle, mais à classer les bâtiments entre eux.

- L'écart de modélisation (Design Gap) : La différence entre une simulation dynamique avancée (BEM - Building Energy Modeling) et la mesure in-situ. Ici, l'écart provient souvent d'une mauvaise représentation physique des phénomènes ou d'erreurs de paramétrage (*Reducing Building Energy Performance Gap: Integrating Agent-Based Modelling and Building Performance Simulation* | MDPI, s. d.).
- L'écart de réalisation : La différence imputable à la qualité de la construction (défauts d'étanchéité, ponts thermiques non traités, substitution de matériaux sur le chantier) (Moradi et al., 2024).

## 2. Les Causes Profondes : Une Analyse Multifactorielle

La littérature identifie trois catégories principales de facteurs contribuant au "Performance Gap" :

L'Incertitude des Spécifications (20-60% de l'impact) : Les propriétés thermiques des matériaux en œuvre diffèrent souvent des valeurs de laboratoire. Le vieillissement des isolants, leur teneur en humidité ou la compaction des matériaux en vrac modifient la résistance thermique réelle des parois (van Dronkelaar et al., 2016).

Le Comportement des Occupants (10-80% de l'impact) : C'est souvent la variable la plus volatile. Les modèles de simulation utilisent des profils d'occupation déterministes (horaires fixes, températures de consigne constantes). Or, la réalité est stochastique : ouverture des fenêtres, modification des consignes, utilisation intensive des appareils électriques, présence irrégulière. L'impact de l'occupant est d'autant plus fort que le bâtiment est performant (van Dronkelaar et al., 2016).

La Gestion et la Maintenance (15-80% de l'impact) : Les systèmes de CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation) modernes sont complexes. Un mauvais réglage des courbes de chauffe, des capteurs décalibrés ou une Gestion Technique du Bâtiment (GTB) mal programmée peuvent ruiner les efforts de conception (van Dronkelaar et al., 2016)

Face à ce constat, les approches purement numériques montrent leurs limites. Il devient indispensable de disposer de données expérimentales fiables pour calibrer les modèles et comprendre la physique réelle des phénomènes. C'est la mission première des laboratoires comme le laboratoire Jacques Geelen : fournir une "vérité terrain" contrôlée (*Laboratory - Uliège - Bems - ULiège*, s. d.).

## 2. La physique du bâtiment moderne : pourquoi l'approche statique est obsolète

Pendant des décennies, la thermique du bâtiment a été dominée par des calculs en régime stationnaire (ou quasi-stationnaire), tels que décrits dans les anciennes versions des normes thermiques. Cette approche suppose que les conditions intérieures et extérieures sont constantes ou varient suffisamment lentement pour que les termes de stockage d'énergie soient négligeables.

### 1. L'Obsolescence du Régime Statique

L'approche statique se concentre sur la résistance thermique (R) et le coefficient de transmission (U). Elle calcule les pertes par conduction comme étant linéairement proportionnelles à la différence de température ( $\Delta T$ ). Si cette méthode reste acceptable pour des bâtiments anciens peu isolés et très déperditifs (où le flux de chaleur est dominant), elle devient erronée pour les bâtiments modernes (*Static vs Dynamic Analysis*, 2017).

Les bâtiments actuels (NZEB - Nearly Zero Energy Buildings) sont caractérisés par :

- Une isolation très forte qui réduit les flux par conduction.
- Une étanchéité à l'air élevée qui minimise les pertes par infiltration incontrôlée.
- Une importance accrue des apports solaires et des gains internes (chaleur dégagée par les occupants et les équipements).

Dans ce contexte, les phénomènes transitoires deviennent prépondérants. Ignorer la dynamique temporelle revient à ignorer une part substantielle de l'équation énergétique (Moortel et al., 2022).

### 2. La Nécessité du Régime Dynamique : Inertie et Déphasage

L'analyse dynamique prend en compte la capacité thermique (C) des matériaux, c'est-à-dire leur aptitude à stocker l'énergie.

- Inertie Thermique : Un bâtiment à forte inertie (béton, pierre) peut stocker les apports solaires gratuits de la journée pour les restituer la nuit. Cela lisse les pics de demande de chauffage et de refroidissement. Les études montrent que l'approche dynamique peut prédire des besoins de chauffage jusqu'à 46%

inférieurs à l'approche statique pour certains systèmes, car elle valorise cette énergie stockée "gratuitement" (Moortel et al., 2022).

- Déphasage et Amortissement : L'onde thermique extérieure (le cycle jour/nuit de la température) ne traverse pas une paroi instantanément. Elle est amortie (réduction de l'amplitude) et déphasée (retard dans le temps). Une modélisation dynamique correcte permet de prédire le confort d'été et les risques de surchauffe, là où un calcul statique serait aveugle aux variations horaires de température (Verbeke & Audenaert, 2018).
- Interaction Solaire : Les vitrages modernes et les protections solaires actives nécessitent une modélisation fine de l'angle d'incidence solaire et de la réponse thermique rapide des ambiances intérieures, ce que seuls des pas de temps courts (horaires ou infra-horaires) permettent (Verbeke & Audenaert, 2018).

Le Laboratoire Jacques Geelen, en utilisant une chambre climatique capable de faire varier les conditions limites (température, humidité) de manière contrôlée dans le temps, se positionne comme un outil indispensable pour étudier ces régimes transitoires que la théorie statique échoue à capturer (*Presentation*, s. d.).

### 3. La Nécessité de l'Échelle Réelle (Full-Scale) : Justification Scientifique

Dans le domaine de la recherche expérimentale, une question récurrente se pose : pourquoi investir dans des infrastructures lourdes et coûteuses à l'échelle du bâtiment entier (Full-Scale) alors que des tests sur échantillons en laboratoire sont possibles ? La réponse réside dans la complexité systémique du bâtiment.

#### 1. Limites des Tests sur Échantillons (Hot Box)

Les méthodes de laboratoire sur échantillons, telles que la boîte chaude gardée (Guarded Hot Box) selon les normes ASTM C1363 ou ISO 8990, sont excellentes pour caractériser les propriétés intrinsèques d'un matériau ou d'un assemblage simple (un panneau de mur, une fenêtre) (O'Leary & Duffy, 2018).

Cependant, ces tests présentent des limites intrinsèques :

- Effets de Bords et Dimensionnalité : Ils ne capturent pas les effets de jonction tridimensionnels (nœuds constructifs) entre les murs, les planchers et les

toitures, qui sont souvent le siège de ponts thermiques critiques (Jin et al., 2024).

- Absence d'Interactions Systémiques : Un test sur échantillon ne permet pas d'observer l'interaction entre l'enveloppe et le système de chauffage (ex: convection induite par un radiateur contre un mur froid) ou l'impact de la ventilation sur les infiltrations d'air (Schumacher et al., s. d.).
- Conditions Idéalisées : Les échantillons sont souvent préparés avec soin en laboratoire, ne reflétant pas les imperfections de mise en œuvre réelles (joints mal faits, tassement de l'isolant) qui affectent la performance in-situ (« The Difference Between In Situ Testing and Lab Analysis », s. d.).

## 2. La Plus-Value Scientifique du Full-Scale

L'expérimentation à l'échelle réelle (in-situ ou en cellules de grande dimension) permet de valider le comportement global du bâtiment en tant que système intégré.

- Réalisme des Conditions aux Limites : Les tests Full-Scale exposent le bâtiment à des champs de pression réels, à des gradients de température verticaux (stratification de l'air) et à des interactions radiatives complexes entre les parois internes (Jin et al., 2024)
- Validation des Modèles de Simulation (BES Validation) : Pour valider des logiciels comme EnergyPlus ou TRNSYS, il est impératif de disposer de données expérimentales où tous les phénomènes couplés sont présents. Les exercices de validation de l'Annexe 58 de l'AIE ont démontré que même avec des modèles sophistiqués, la prédiction du comportement d'une pièce réelle reste un défi sans données de calibration de haute qualité issues de tests Full-Scale (Janssens, s. d.-a).
- Intégration des Systèmes Actifs : Seul un test à l'échelle réelle permet de vérifier l'efficacité des stratégies de contrôle (ex: régulation prédictive) et l'interaction entre la production d'énergie (PV, pompe à chaleur) et la demande thermique du bâtiment (*Laboratory - Uliege - Bems - ULiège*, s. d.).

En conclusion, si les tests sur matériaux sont nécessaires, ils ne sont pas suffisants. L'échelle réelle est le seul moyen de fermer la boucle entre la théorie et la réalité

opérationnelle, justifiant l'existence d'infrastructures comme le laboratoire Jacques Geelen ou les Twin Houses du Fraunhofer.

### III. État de l'art des infrastructures expérimentales à l'échelle réelle : Typologies et standardisation

La diversité des questions de recherche a conduit au développement d'une grande variété d'infrastructures expérimentales. Pour mettre de l'ordre dans ce paysage hétérogène, la communauté internationale, sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), a travaillé à une classification et une standardisation des outils et des méthodes.

#### 1. Classification des Infrastructures (selon l'Annexe 58)

Le projet Annex 58 de l'AIE EBC, intitulé "Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements", a établi une typologie de référence pour les installations de test (Saelens & Reynders, s. d.). Cette classification permet de situer précisément le laboratoire Jacques Geelen dans l'écosystème mondial.

##### 1. Les Cellules de Test (Test Cells) et le Standard PASLINK

Les cellules de test sont des modules expérimentaux, généralement de la taille d'une petite pièce, conçus pour tester des composants d'enveloppe en conditions extérieures réelles.

- Définition : Une cellule test est typiquement constituée d'une enceinte très isolée dont une face est amovible pour accueillir l'élément à tester (fenêtre, mur solaire, façade ventilée).
- Le Standard PASLINK : Issu du projet européen PASSYS, le réseau PASLINK a développé le concept de "Cellule Test Calorimétrique". Ces cellules sont équipées d'un système de "Pseudo-Adiabatic Shell" (PAS). Ce système utilise des capteurs de flux thermique et un chauffage actif dans les parois de la cellule pour annuler ou mesurer précisément les flux de chaleur parasites traversant l'enveloppe de la cellule elle-même. Cela garantit que toute l'énergie mesurée dans la cellule provient exclusivement du composant testé en façade sud (Janssens, s. d.-a).

- Objectif : Caractérisation physique fine (U-value, g-value) de composants innovants sous sollicitations climatiques réelles. Elles sont un maillon intermédiaire entre le laboratoire de matériaux et le bâtiment réel (KU LEUVEN, s. d.).

## 2. Les Maisons Tests (Test Houses / Twin Houses)

Il s'agit de bâtiments complets, souvent des maisons individuelles, instrumentés de manière intensive pour étudier le comportement global.

- Maisons Jumelles (Twin Houses) : Ce sont deux maisons strictement identiques construites côte à côte. L'une sert de référence (Reference House) et l'autre de test (Test House).
  - *Principe scientifique* : En soumettant les deux maisons au même climat réel simultanément, on élimine la variable météorologique de l'équation comparative. Si l'on change le système de chauffage dans la maison test, la différence de consommation mesurée par rapport à la maison de référence est imputable uniquement à ce changement, avec une très grande fiabilité statistique (Strachan et al., s. d.).
  - *Exemple* : Les Twin Houses du Fraunhofer IBP à Holzkirchen sont équipées de systèmes de chauffage au gaz, électrique et de planchers chauffants hydrauliques, ainsi que de simulateurs d'occupation (production de chaleur et d'humidité artificielles)(*Twin Houses*, s. d.).
- Maisons Flexibles : Des structures comme le FLEXLAB du LBNL permettent de reconfigurer l'enveloppe, l'éclairage et les systèmes CVC pour simuler différents types de bâtiments commerciaux. Le FLEXLAB dispose même d'un lit de test rotatif pour modifier l'orientation du bâtiment par rapport au soleil (*FLEXLAB*, s. d.).

## 3. Les Chambres Climatiques (Climate Chambers)

Ce sont des laboratoires "indoor" où un volume de test (bâtiment ou pièce) est placé à l'intérieur d'une grande enceinte thermique.

- **Principe** : Contrairement aux cellules PASLINK ou aux Twin Houses exposées au climat réel, les chambres climatiques permettent de contrôler artificiellement

les conditions "extérieures" (température, humidité, et parfois rayonnement solaire via des lampes).

- **Avantages** : Répétabilité parfaite des expériences (on peut rejouer le même scénario climatique à l'infini) et possibilité de tester des conditions extrêmes (canicule, grand froid) à la demande, sans attendre la météo (*Presentation*, s. d.).
- **Le Cas du Laboratoire Jacques Geelen** : Avec sa chambre climatique de 50 m<sup>3</sup> entourée d'une zone tampon contrôlée, le laboratoire de l'ULiège appartient à cette catégorie. Il permet des études précises sur les systèmes de ventilation, le confort thermique et la réponse dynamique des émetteurs de chaleur, indépendamment des aléas météorologiques extérieurs (*Presentation*, s. d.).

## 2. Les Standards Méthodologiques : Protocoles de Mesure Reconnus

L'existence d'infrastructures ne suffit pas ; il faut des méthodes de mesure standardisées pour produire des résultats exploitables. Le réseau d'excellence **DYNASTE** joue un rôle pivot dans la diffusion de ces protocoles (Janssens, s. d.-b).

### 1. La Méthode Co-heating

Le test de co-heating est considéré comme la méthode de référence pour mesurer le coefficient de perte thermique global (HTC - Heat Transfer Coefficient) d'un bâtiment in-situ.

- **Protocole** : Le bâtiment (inoccupé) est chauffé électriquement à une température intérieure constante et homogène (par exemple 25°C) pendant une période de 1 à 3 semaines, généralement en hiver. Des ventilateurs brassent l'air pour assurer l'homogénéité.
- **Analyse** : On trace la puissance de chauffage quotidienne moyenne en fonction de la différence de température intérieur/extérieur (Delta T). La pente de la régression linéaire donne le HTC (en W/K). On corrige les données pour tenir compte du rayonnement solaire qui apporte de la chaleur gratuite (Léthé, 2016).
- **Normalisation** : Bien qu'il n'y ait pas de norme ISO unique dédiée exclusivement au co-heating, la méthode suit les principes de bilan énergétique

décrits dans la norme **ISO 13790** et plus récemment **ISO 52016** (Jack et al., 2018).

- **Limites** : La nécessité de vacance du bâtiment pendant plusieurs semaines et la dépendance à des conditions météorologiques froides et peu ensoleillées en font une méthode lourde (Stamp et al., 2017).

## 2. La Méthode QUB (Quick U-value of Buildings)

Pour pallier la lenteur du co-heating, la méthode QUB a été développée comme une alternative rapide dynamique.

- **Principe** : La méthode QUB repose sur une réponse indicielle et s'exécute typiquement en une seule nuit (pour s'affranchir des gains solaires). Le protocole comprend deux phases : une phase de chauffage à puissance constante (montée en température) suivie d'une phase de refroidissement libre (extinction du chauffage).
- **Calcul** : Le coefficient de perte thermique (HLC) est déterminé par l'analyse de la réponse dynamique de la température (les pentes de montée et de descente) à l'aide d'un modèle RC (Résistance-Capacité) simplifié. La formule relie la puissance injectée et les dérivées de température (Pandraud & Isover, s. d.).
- **Validation** : Des campagnes de tests comparatifs (notamment par le BRE, Saint-Gobain et dans le cadre de l'Annexe 58) ont montré que le QUB peut estimer le HLC avec une précision comparable au co-heating ( $\pm 15\%$  dans de bonnes conditions) mais en un temps record (Pandraud & Isover, s. d.). Bien que prometteuse, elle n'a pas encore atteint le même niveau de standardisation normative que les méthodes stationnaires type ISO 9869.

## 3. L'Identification de Systèmes (System Identification)

L'approche moderne ne se contente pas de mesurer des moyennes. Elle utilise des techniques statistiques avancées (comme le CTSM - Continuous Time Stochastic Modelling) pour analyser les séries temporelles de données. Cela permet de séparer dynamiquement les effets du vent, du soleil et de la capacité thermique, et d'identifier les paramètres physiques (R, C) du bâtiment avec une grande précision, même sur des données de courte durée (Saelens & Reynders, s. d.). C'est une compétence clé développée au sein des réseaux Annex 58 et 71.

### 3. Cartographie des Acteurs Majeurs (2015-2025)

Le paysage des infrastructures de recherche en énergétique du bâtiment est structuré autour de quelques pôles d'excellence en Europe et en Amérique du Nord. Ce panorama permet de situer le niveau de compétition et de collaboration pour le laboratoire Jacques Geelen.

#### 1. Les Géants Européens

- **Fraunhofer IBP (Allemagne)** : Situé à Holzkirchen, c'est le leader historique. Ses installations comprennent les célèbres **Twin Houses** (décrites plus haut), mais aussi le plus grand site de test extérieur pour composants (expositions aux intempéries) et des laboratoires de confort thermique (Flight Test Facility pour l'aéronautique) (*Twin Houses*, s. d.).
- **EnergyVille (Belgique)** : Basé à Genk (Thor Park), ce centre est une collaboration entre la KU Leuven, le VITO, l'imec et l'UHasselt. Il dispose d'infrastructures ultra-modernes dont **THOREAQ** (deux maisons jumelles modulaires pour tester des enveloppes et systèmes CVC) et des laboratoires dédiés aux réseaux thermiques et électriques intelligents (Battery Lab, Thermo-technical Lab) (*EnergyVille Expands Open Thor Living Lab with Innovative Thermal Network and New Research Buildings | VITO*, s. d.). C'est un concurrent direct et un partenaire potentiel majeur pour l'ULiège.
- **KU Leuven (Belgique)** : Le laboratoire VLIET est une référence académique pour l'étude de la physique du bâtiment (transferts d'humidité et de chaleur) et a servi de base à de nombreux travaux de l'Annexe 58 (Janssens, s. d.-b).
- **CEA INES (France)** : L'Institut National de l'Énergie Solaire (Le Bourget-du-Lac) gère la plateforme **INCAS** (quatre maisons expérimentales pour tester le solaire passif et actif) et les cellules **FACT** pour les composants de façade. Ils sont spécialisés dans l'intégration du solaire (BIPV) et le stockage (Janssens, s. d.-b).
- **BRE (Royaume-Uni)** : Avec son **Innovation Park** à Watford, le BRE propose un modèle différent : un parc de maisons démonstrateurs construites par des industriels pour tester et vitriner des technologies bas carbone proches du marché (*BRE Watford Innovation Park*, s. d.).

- **CSTB (France)** : Outre ses laboratoires de certification, le CSTB dispose de la soufflerie climatique **Jules Verne** à Nantes, une installation unique capable de simuler des conditions climatiques extrêmes (pluie battante, tempête, sable) sur des bâtiments entiers ou des véhicules (« Jules Verne Climatic Wind Tunnel », 2024).

## 2. Les Leaders Nord-Américains

- **LBNL (Lawrence Berkeley National Lab, USA)** : Le **FLEXLAB** est sans doute l'installation la plus avancée pour le bâtiment tertiaire. Il s'agit d'un banc d'essai rotatif (pour suivre ou simuler l'orientation solaire) permettant de tester des systèmes intégrés (façade + éclairage + CVC + contrôle). Il opère comme un "User Facility" ouvert aux industriels pour dérisquer leurs technologies (*FLEXLAB*, s. d.).
- **NREL (National Renewable Energy Lab, USA)** : Le laboratoire se distingue par son focus sur l'intégration réseau. Son **ESIF** (Energy Systems Integration Facility) et son **Systems Performance Laboratory** permettent de connecter des équipements domestiques physiques à des simulations de réseau électrique (Hardware-in-the-Loop) pour tester la flexibilité énergétique (*Systems Performance Laboratory | Buildings | NLR*, s. d.).
- **CCHT (Canadian Centre for Housing Technology, Canada)** : Géré par le CNRC, ce centre possède des maisons jumelles spécialisées dans le climat froid, avec une capacité unique de simuler l'occupation humaine (douches, cuisine, appareils) via des automates programmables pour des tests ultra-réalistes (Canada, 2019).

<i>Infrastructure</i>	Pays	Type	Spécialité Principale
<b>Fraunhofer IBP</b>	Allemagne	Twin Houses + Site extérieur	Validation physique, Enveloppe, Confort
<b>EnergyVille (THOREAQ)</b>	Belgique	Twin Houses + Labs	Smart Grid, Réseaux thermiques, Rénovation
<b>LBNL (FLEXLAB)</b>	USA	Cellules rotatives modulaires	Tertiaire, Systèmes intégrés, Éclairage

<b>NREL (ESIF)</b>	USA	Hardware-in-the-Loop	Intégration réseau, Flexibilité, Stockage
<b>CEA INES (INCAS)</b>	France	Maisons expérimentales	Solaire actif/passif, Stockage
<b>CSTB (Jules Verne)</b>	France	Soufflerie Climatique	Conditions extrêmes, Vent, Pluie
<b>Lab. Jacques Geelen</b>	Belgique	Chambre Climatique	CVC, Dynamique, Répétabilité contrôlée

Tableau 1 : Récapitulatif des infrastructures majeures

## IV. Dynamiques d'évolution et modèles de gestion des infrastructures de recherche

L'analyse des tendances post-2020 montre que les laboratoires ne sont plus seulement des lieux de mesure physique, mais des interfaces complexes entre le monde réel et le monde virtuel, nécessitant de nouveaux modèles économiques et de gestion.

### 1. Évolution Technologique des Laboratoires : L'Intégration du "Smart"

La simple mesure de température ne suffit plus. Les laboratoires de pointe intègrent désormais des couches numériques sophistiquées.

#### 1. IoT et Densification des Mesures

Les infrastructures modernes déploient des réseaux de capteurs massifs. Une maison test au CCHT ou à EnergyVille peut contenir plus de 250 à 500 capteurs (température, humidité, CO<sub>2</sub>, présence, flux, consommation circuit par circuit) (Canada, 2019). L'Internet des Objets (IoT) permet une remontée de données en temps réel vers le cloud, facilitant l'analyse big data. Au laboratoire Jacques Geelen, l'intégration de plus de 150 capteurs démontre cette volonté de maillage fin pour capturer les hétérogénéités thermiques (*Laboratory - Uliège - Bems - ULiège*, s. d.).

#### 2. Digital Twins (Jumeaux Numériques)

Le Jumeau Numérique est la réplique virtuelle dynamique de l'infrastructure physique.

- **Application** : Il ne s'agit plus seulement d'un modèle BIM 3D, mais d'un modèle de simulation (type Modelica ou EnergyPlus) alimenté en temps réel par les capteurs du laboratoire. Cela permet de faire du **calage de modèle en continu**, de la détection de fautes (FDD) et du contrôle prédictif (MPC).
- **Synergie** : Le laboratoire physique sert à valider le jumeau numérique, qui est ensuite utilisé pour extrapoler les résultats sur d'autres climats ou scénarios d'usage. Le LBNL et EnergyVille sont pionniers dans l'utilisation des Digital Twins pour optimiser la gestion énergétique à l'échelle du quartier (Sghiri et al., 2025).

#### 3. Smart Grids et Hardware-in-the-Loop (HiL)

L'intégration des bâtiments dans les réseaux intelligents (Smart Grids) est la nouvelle frontière. Les tests ne portent plus seulement sur l'économie d'énergie, mais sur la **flexibilité énergétique** (capacité à décaler la consommation).

- **Technique HiL** : La simulation *Hardware-in-the-Loop* est devenue cruciale. Elle permet de tester un équipement physique réel (ex: une pompe à chaleur ou une batterie installée dans le labo) en le connectant virtuellement à une simulation de réseau électrique ou de bâtiment. Le NREL et le LBNL utilisent cette technique pour tester comment des équipements réagissent à des signaux de prix du marché de l'électricité sans avoir à construire un réseau physique complet (*Systems Performance Laboratory | Buildings | NLR*, s. d.). C'est une direction stratégique majeure pour les laboratoires universitaires souhaitant travailler sur l'intégration des énergies renouvelables.

## 2. Modèles Économiques et Stratégiques

La viabilité économique de ces infrastructures lourdes est un défi constant.

### 1. Financement Public et Mission de Recherche

Les laboratoires universitaires (comme ULiège) et les instituts nationaux (NREL, Fraunhofer) s'appuient sur un socle de financement public ("Base Funding").

- **Modèle Fraunhofer** : Le célèbre "modèle Fraunhofer" vise un équilibre tripartite : environ 1/3 de financement de base public (pour la recherche exploratoire), 1/3 de projets publics compétitifs (type Horizon Europe), et 1/3 de contrats directs avec l'industrie (*Finances*, s. d.). Cela garantit à la fois l'indépendance scientifique et la pertinence industrielle.
- **Modèle US DOE** : Les laboratoires comme le NREL ou le LBNL sont financés majoritairement par le Département de l'Énergie américain (DOE) pour des missions d'intérêt national, mais ouvrent leurs installations (User Facilities) aux chercheurs externes et industriels via des appels à projets compétitifs (OSTI, 2016) (OSTI, 2016).

### 2. Services à l'Industrie : Une Nécessité Croissante

Pour amortir les coûts et financer la mise à jour des équipements, les laboratoires développent des activités commerciales.

- **Certification et Essais** : Le CSTB tire une part significative de ses revenus (près de 50%) d'activités commerciales (certification, avis techniques), ce qui lui permet de financer sa recherche mais crée parfois une tension entre mission de service public et rentabilité (*Le Centre scientifique et technique du bâtiment | Cour des comptes, 2017*).
- **Validation de Produits** : Le FLEXLAB (LBNL) facture ses services aux industriels pour tester des prototypes de façades ou de systèmes de contrôle en conditions réelles avant leur commercialisation, offrant un rapport de "tierce partie" crédible (*FLEXLAB, s. d.*).
- **Projets Collaboratifs (EnergyVille)** : Le modèle d'EnergyVille repose sur une forte intégration avec l'écosystème local (Thor Park, ville de Genk), attirant des financements régionaux (FEDER) et industriels pour des projets de démonstration à l'échelle du quartier (Living Labs) (*rubenvaes.be, s. d.*).

### 3. Les Indicateurs de Compétitivité (KPIs)

Pour juger de la performance d'un laboratoire comme celui de l'ULiège face à la concurrence internationale, plusieurs indicateurs clés de performance (KPIs) sont pertinents.

#### 1. KPIs Scientifiques et Académiques

- **Production Scientifique** : Le nombre de publications dans des revues à haut facteur d'impact (Q1) et le nombre de citations restent le standard académique.
- **Thèses de Doctorat** : La capacité à former des chercheurs est vitale. Le laboratoire Jacques Geelen accueille des thèses sur des sujets variés (matériaux biosourcés, confort thermique), ce qui témoigne de sa vitalité académique (*PhD Thesis, s. d.*).<sup>74</sup>
- **Participation aux Réseaux** : L'implication active dans les Annexes de l'AIE (Annex 58, 71) est un marqueur fort de reconnaissance internationale et d'influence sur les standards futurs (Janssens, s. d.-b).

#### 2. KPIs Économiques et d'Innovation

- **Revenus Industriels** : La part du budget provenant de contrats privés mesure l'attractivité de l'offre de service pour le marché.

- **Taux d'Utilisation** : Pour une chambre climatique, le nombre de jours de test effectifs par an est un indicateur d'efficacité opérationnelle (*Advanced Computing Annual Report: Fiscal Year 2023 | NLR, s. d.*).
- **Valorisation** : Le nombre de brevets déposés et la création de spin-offs (comme *EnFoil* pour EnergyVille) démontrent la capacité à transformer la recherche en innovation tangible (EnergyVille Foundation, 2024).

### 3. Accréditations et Qualité

La détention d'accréditations (type ISO 17025 pour les laboratoires d'essais) est souvent un prérequis pour travailler avec certains industriels et garantir la qualité et la traçabilité des mesures, un aspect sur lequel le laboratoire BEMS pourrait devoir se positionner pour accroître ses partenariats (« Building Envelope Testing », s. d.).

## V. Démarche méthodologique : Du standard technique à l'indicateur stratégique

Les chapitres précédents ont permis d'établir la nécessité impérieuse des mesures dynamiques et de dresser l'état de l'art des infrastructures existantes à travers le prisme de l'Annexe 58 de l'IEA. Cependant, pour positionner efficacement le Laboratoire Jacques Geelen (LJG) dans ce paysage complexe, une simple comparaison descriptive ne suffira pas. Il est nécessaire de déployer une démarche structurée capable de transformer des caractéristiques techniques hétérogènes en outils d'aide à la décision stratégique.

Ce chapitre détaille la démarche méthodologique mise en œuvre pour mener à bien ce benchmarking. Il explicite le passage d'une approche purement ingénieriale, basée sur l'inventaire technique, à une approche plutôt managériale, centrée sur l'évaluation de la performance et de la compétitivité.

### 1. Opérationnalisation de la recherche

Pour répondre à l'objectif général de positionnement stratégique défini en introduction de ce mémoire, la démarche présentée ne se limite pas à observer l'existant. Elle s'articule autour de certains objectifs opérationnels successifs qui structurent la progression de notre analyse. Il s'agit des 4 objectifs suivants :

1. Identifier et caractériser un échantillon représentatif : Il s'agit d'extraire de la littérature technique (notamment de la « subtask 1a » de l'Annexe 58) les infrastructures qui partagent avec le LJG la même finalité, mais surtout la même typologie : l'étude de la performance énergétique des bâtiments à partir de mesures dynamiques en vraie grandeur, en tant que bâtiment de tests. Cette étape vise à constituer un panel de référence cohérent.
2. Construire un référentiel de comparaison multidimensionnel : L'objectif est de traduire les données techniques brutes (configuration, équipements, méthodes) en indicateurs de performance stratégique intelligibles, pour un gestionnaire ou n'importe quel utilisateur.
3. Objectiver les écarts de performance : En appliquant cette grille de lecture au LJG et à ses concurrents, Il s'agira de chercher à révéler les écarts de compétitivité, qu'ils soient technologiques, structurels ou scientifiques.

4. Formuler des recommandations stratégiques : Sur la base de ce diagnostic, nous définirons une feuille de route visant à renforcer les capacités expérimentales et la visibilité scientifique du laboratoire à l'horizon 2030.

## 2. Constitution du panel de référence : Sélection par homogénéité typologique

Pour garantir la validité de la comparaison, il était impératif de ne confronter le Laboratoire Jacques Geelen (LJG) qu'à des structures de même nature physique. L'inventaire de l'Annexe 58 recense une grande diversité d'outils, allant de la simple boîte d'un mètre cube (Test Cell) au quartier complet (Living Lab).

Un filtre typologique strict a été appliqué pour constituer l'échantillon, en ne retenant que les infrastructures classées dans la catégorie « Test Building » (Bâtiment d'Essai), correspondant à celle du LJG d'après l'annex 58.

Ce critère de sélection repose sur trois exigences communes à toutes ces structures :

1. L'échelle 1:1 (Full-Scale) : La capacité à tester un bâtiment entier accessible à l'homme, permettant d'analyser les interactions complexes entre zones.
2. L'approche systémique : La possibilité d'intégrer et de tester des systèmes actifs (CVC, stockage) en interaction avec le bâti, au-delà de la simple isolation.
3. L'occupation contrôlée : La capacité à simuler des scénarios d'usage précis, les distinguant des bancs d'essais de matériaux.

Sur la base de ce filtre, le panel élargi se compose de 8 infrastructures de référence, incluant une ouverture hors Europe (USA) pour capter les tendances mondiales les plus avancées.

Elles peuvent être réparties en trois groupes stratégiques pour les besoins de l'analyse :

- Groupe A : Les Leaders Mondiaux
  - *FLEXLAB (LBNL - USA), Energy Flex House (DTI - Danemark), Salford Energy House (UK).*
  - Caractéristique : Ces structures représentent le sommet du panel. Le FLEXLAB californien, avec son lit rotatif et ses capacités "Hardware-in-the-Loop" massives, est une référence qui fixe le standard de 2030.

- Groupe B : Les spécialistes
  - *KUBIK (Espagne) et Twin Houses (Allemagne).*
  - Caractéristique : Sélectionnés pour leur architecture unique permettant soit une reconfiguration totale des murs (KUBIK), soit une comparaison stricte "côte-à-côte" (side-by-side) dans deux bâtiments identiques (Twin Houses).
  
- Groupe C : Les Challengers Européens
  - *INCAS Platform (France), VERU Facility (Allemagne) et LECE (Espagne).*
  - Caractéristique : Ce groupe constitue le "cœur de cible" pour le benchmarking du LJJ. Ce sont des structures académiques ou semi-publiques, aux dimensions et budgets comparables, qui affrontent les mêmes défis de modernisation que le LJJ.

### 3. La matrice de traduction : Du critère technique à la dimension stratégique

Pour dépasser la simple comparaison technique (qui consisterait à seulement juxtaposer des listes d'équipements), Une grille d'analyse a été structurée autour de cinq dimensions composites. Ce modèle permettra in fine d'évaluer la compétitivité du laboratoire sous un angle systémique, couvrant à la fois ses actifs physiques, sa maturité technologique et sa performance académique.

Le tableau ci-dessous explicite le processus de conversion méthodologique : il montre comment les données techniques brutes, extraites des rapports de l'Annexe 58 et des publications, sont agrégées pour former nos cinq indicateurs de gestion.

INDICE	CRITÈRES TECHNIQUES	JUSTIFICATION (Pourquoi ce critère ?)
<b>1. FLEXIBILITÉ STRUCTURELLE (IFS)</b>	Mobilité des parois (Fixe vs Démontable) Modularité des espaces (Cloisons internes) Vitesse de reconfiguration	Mesure l'agilité du laboratoire : sa capacité à pivoter rapidement d'un client à l'autre ou d'un test à l'autre

<b>2. MAÎTRISE ENVIRONNEMENTALE (IME)</b>	Type de climat (Réel vs Artificiel/Contrôlé) Espace "Buffer" (Zone tampon) Précision de la consigne T°	Mesure la qualité de service : la capacité à garantir des conditions stables et répétables, indépendamment des aléas météorologiques
<b>3. MATURITÉ CYBER-PHYSIQUE (IMCP)</b>	Nombre de capteurs Monitoring Temps Réel Jumeau Numérique / Hardware-in-the-Loop	Mesure l'alignement avec les standards Technologiques 2030. Indique si le labo est "Smart Ready" ou en obsolescence numérique
<b>4. RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE (IRS)</b>	Publications (2020-2024) Projets internationaux	Mesure la productivité et l'attractivité académique
<b>5. TRAJECTOIRE ET RÉSILIENCE (ITR)</b>	Ancienneté (Année de création) Diversité des tests Rénovations	Mesure la durabilité du modèle économique. Évalue la capacité du laboratoire à survivre et à évoluer au-delà de sa mission initiale

Tableau 2 : Matrice de traduction des données en indicateurs

Le choix de ces indicateurs ne doit rien au hasard ; il reflète la chaîne de valeur complète d'une infrastructure de recherche moderne :

1. L'Indice de Flexibilité Structurale (IFS) : Dans un marché de la recherche où les besoins évoluent rapidement (nouveaux matériaux, rénovation légère), la rigidité d'une infrastructure peut représenter un handicap. Une infrastructure capable de reconfigurer ses parois en quelques jours offre une réactivité supérieure à une structure figée. Pour le LJG, il s'agira de vérifier si son architecture de 2003 reste compétitive face aux structures modulaires comme celles de type "Meccano".
2. L'Indice de Maîtrise Environnementale (IME) : La raison d'être scientifique d'un laboratoire est la production de données fiables. La capacité à imposer des conditions climatiques précises (répétabilité) distingue un laboratoire professionnel de simples mesures in-situ. Cet indice valorise les infrastructures disposant de climats artificiels ou semi-contrôlés.
3. L'Indice de Maturité Cyber-Physique (IMCP) : C'est le marqueur de l'Industrie 4.0 appliquée au bâtiment. Un laboratoire test moderne ne peut plus être déconnecté. Cet indice évalue le saut technologique vers le "Digital Twin" et

permet de diagnostiquer sans détours le retard ou l'avance du laboratoire sur l'Internet des Objets (IoT).

4. L'Indice de Rayonnement Scientifique (IRS) : Une infrastructure n'a de valeur que si elle produit de la science reconnue. En comptabilisant les outputs (publications, citations), Il s'agit de mesurer le retour sur investissement académique de l'outil.
5. L'Indice de Trajectoire et Résilience (ITR) : Cet indicateur dynamique analyse la capacité de "Pivot" du laboratoire. Il est mis en place pour analyser comment une structure ancienne (comme le LJG) parvient à rester pertinente en diversifiant ses activités (par exemple, en passant du test de murs passifs au test de systèmes de stockage actifs).

#### 4. Système de notation pour l'analyse comparative

Afin de traduire l'analyse qualitative en données visuelles exploitables (sous forme de diagramme en radar), une méthode de notation standardisée est appliquée à l'ensemble du panel. Cette quantification vise à objectiver les écarts de performance entre le Laboratoire Jacques Geelen et les standards internationaux identifiés.

Le système de notation repose sur une échelle de maturité à 5 niveaux (à la manière d'une échelle de Likert). Chaque dimension se voit attribuer un score reflétant le positionnement de l'infrastructure par rapport au panel.

<b>Note</b>	<b>Niveau de Maturité</b>	<b>Définition du critère d'évaluation</b>
<b>1</b>	<b>Obsolescence / Inexistence</b>	La capacité est absente ou repose sur des technologies dépassées (ex: absence totale d'IoT, infrastructure dégradée).
<b>2</b>	<b>Inférieur au standard</b>	La capacité existe mais reste limitée ou contrainte par rapport aux normes actuelles (ex: instrumentation basique, flexibilité nulle).
<b>3</b>	<b>Standard (Moyenne)</b>	L'infrastructure répond aux exigences classiques de la recherche académique actuelle, sans distinction particulière. C'est le niveau "attendu" pour un laboratoire opérationnel.

<b>4</b>	<b>Avancé (Performe)</b>	L'infrastructure démontre une supériorité technique ou méthodologique sur la majorité du panel (ex: présence de systèmes complexes, forte visibilité).
<b>5</b>	<b>État de l'art</b>	L'infrastructure définit la référence mondiale. Elle dispose de capacités uniques ou pionnières (ex: Jumeau Numérique complet, modularité totale).

Tableau 3 : Échelle de notation de la compétitivité

La notation n'est pas absolue mais relative. Le score maximal est étalonné sur les performances des leaders du panel. Par conséquent, un score « moyen » pour le LJG ne signifie pas une performance médiocre, mais un alignement sur la moyenne sectorielle. À l'inverse, un score de 1 voire 2 signale un décrochage stratégique nécessitant une action corrective prioritaire.

Ce protocole de scoring permet in fine de tracer un profil de compétitivité (Radar Chart) présenté plus tard lors des résultats, mettant en évidence les asymétries entre les capacités physiques (souvent élevées) et les capacités numériques (parfois en retrait).

## 5. Protocole de collecte et limites méthodologiques

La fiabilité du benchmarking repose sur la qualité des informations exploitées. Cette section détaille le processus d'investigation et trace le périmètre de validité des résultats. Afin de pallier l'absence d'audits sur site, impossible dans le cadre de ce travail, l'analyse s'appuie sur une méthodologie de recherche documentaire croisant trois typologies de sources :

1. La littérature technique de référence (Le Socle) : Les rapports finaux issus de l'Annexe 58 de l'IEA, notamment la sous-tâche 1a qui inventorie les différentes structures, constituent la base de données primaire. Ils fournissent les caractéristiques structurelles invariables (dimensions, matériaux, localisation).
2. La littérature scientifique : Les rapports initiaux étant datés de 2016 au plus tard, une revue des publications récentes associées à chaque laboratoire a été menée. Cela a permis d'identifier certaines mises à niveau technologiques non répertoriées dans les rapports originaux (par exemple un ajout récent de pompes à chaleur connectées).

3. Les données institutionnelles : Les sites web et parfois des contacts directs avec certains des instituts (DTI, LBNL, Tecnalía) ont pu servir de source de vérification pour confirmer l'activité actuelle des infrastructures.

Il convient cependant de souligner trois limites inhérentes à ce protocole, qui doivent être prises en compte dans la lecture des résultats :

**Biais déclaratif :** L'analyse repose exclusivement sur les performances annoncées par les laboratoires eux-mêmes. Aucune vérification métrologique indépendante n'a pu être réalisée. Il est donc supposé que les spécifications techniques publiées soient exactes et maintenues.

**Obsolescence documentaire :** Malgré l'effort d'actualisation, un décalage peut subsister entre la réalité opérationnelle de 2025 et la documentation disponible. Certains équipements décrits dans la littérature peuvent avoir été décommissionnés ou remplacés sans faire l'objet d'une nouvelle publication.

**L'asymétrie des ressources :** La comparaison confronte une structure universitaire de taille modeste à des instituts nationaux disposant de budgets de fonctionnement supérieurs. L'analyse comparative s'attache donc à évaluer l'efficacité et le positionnement stratégique plutôt que la puissance financière brute.

Ce chapitre a permis de définir le cadre opératoire de la recherche. En passant d'un inventaire technique exhaustif à une sélection raisonnée de huit infrastructures de référence, et en traduisant les caractéristiques physiques en cinq indices de gestion, les conditions de départ d'un benchmarking rigoureux sont réunies.

Bien que soumise à certaines limites documentaires, cette méthodologie permet de dépasser la simple description pour entrer dans l'évaluation. La grille d'analyse ainsi construite constitue désormais le prisme à travers lequel le positionnement du Laboratoire Jacques Geelen sera diagnostiqué dans le chapitre suivant, révélant ses atouts structurels comme ses défis technologiques.

# VI. Analyse multidimensionnelle du LJJ

## 1. Cartographie des forces en présence et positionnement concurrentiel

Afin de structurer la diversité des huit laboratoires du panel, une analyse de positionnement a été réalisée selon deux axes orthogonaux, définissant la valeur ajoutée de chaque infrastructure.

L'Axe Vertical évalue la puissance physique de l'outil. Il oppose, en bas, les structures fixes soumises aux aléas climatiques, et en haut, les environnements totalement contrôlés ou cinétiques. Le sommet de cet axe est occupé par les chambres climatiques géantes et les bâtiments rotatifs. L'Axe Horizontal mesure l'intégration du numérique. Il s'étend de la thermique du bâtiment classique (à gauche), focalisée sur l'isolation et l'inertie, vers les systèmes cyber-physiques avancés (à droite), intégrant le Hardware-in-the-Loop, les jumeaux numériques et l'interaction avec le réseau électrique intelligent.

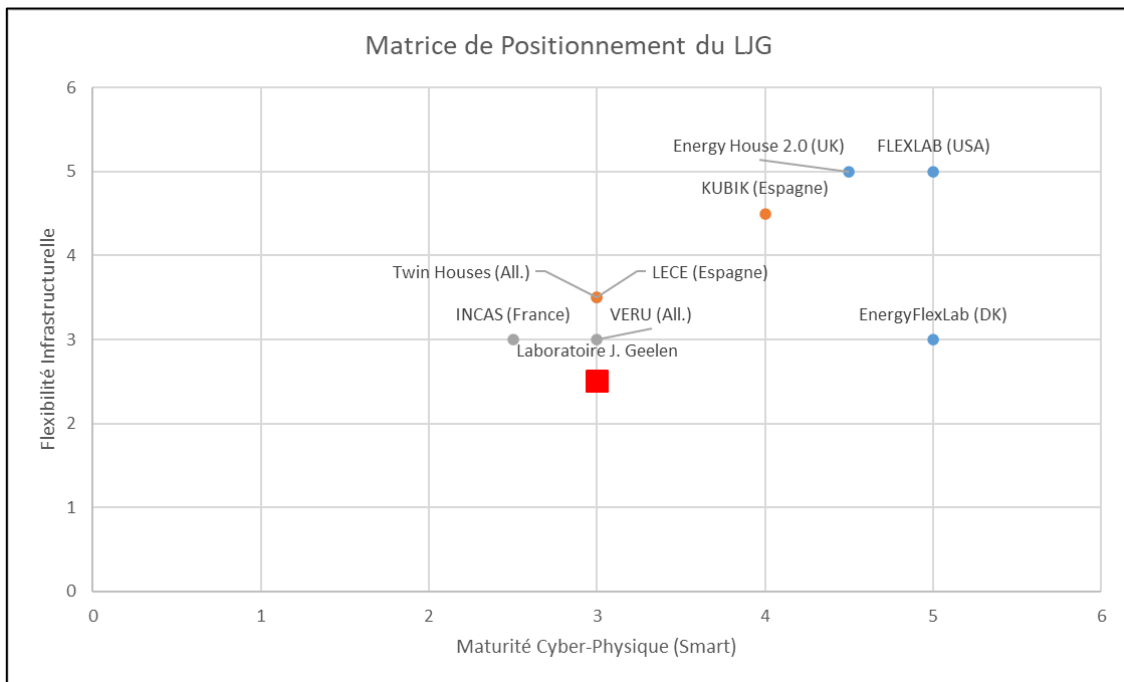


Figure 1 : Matrice de positionnement du LJJ

La projection des huit laboratoires sur cette matrice révèle trois groupes distincts, analysés ci-après.

**Groupe A, Les « Leaders Mondiaux »** : Ce cluster, situé dans le cadran supérieur droit de la matrice, rassemble les infrastructures disposant de capacités industrielles massives, leur permettant de s'affranchir des contraintes naturelles.

- FLEXLAB (USA - LBNL) : Il définit l'état de l'art mondial par sa mobilité. Le bâtiment entier est monté sur une plateforme pivotante capable d'une rotation de 270 degrés, permettant de simuler n'importe quelle orientation solaire sans reconstruction. Couplé à des capacités de Hardware-in-the-Loop permettant de tester des charges virtuelles, il atteint le score maximal sur les deux axes.
- Energy House 2.0 (UK - Salford) : Cette infrastructure se distingue par la maîtrise climatique absolue. Elle abrite deux chambres environnementales géantes capables de contenir chacune deux maisons individuelles complètes. L'installation permet de générer des températures de -20°C à +40°C et de simuler des précipitations, y compris de la neige via des canons dédiés, garantissant une répétabilité totale indépendante de la météo extérieure.
- EnergyFlexLab (Danemark - DTI) : Bien que ses bâtiments soient fixes (score infrastructurel moyen), ce laboratoire excelle sur l'axe numérique grâce à une densité instrumentale dépassant les 700 capteurs et une architecture "Backbone" intégrant le laboratoire au réseau intelligent (Smart Grid) et aux systèmes de stockage.

**Groupe B, Les Spécialistes Structurels** : Ce groupe, positionné en haut à gauche, maximise la modularité architecturale pour des tests d'enveloppe pure, souvent au détriment de la complexité IoT.

- KUBIK (Espagne - Tecnia) : Cette infrastructure pousse la reconfigurabilité à son plein potentiel. Conçue comme une structure "Meccano", elle permet le démontage intégral des façades et des dalles sur une surface configurable allant jusqu'à 500 m<sup>2</sup>. Elle permet de créer des volumes complexes inaccessibles aux structures résidentielles classiques.
- Twin Houses (Allemagne - Fraunhofer IBP) : La valeur ajoutée repose ici sur la gémellité parfaite. Les deux maisons sont structurellement identiques, permettant des tests comparatifs stricts où la météo s'annule. Ce modèle est la référence pour la validation empirique des logiciels de simulation (Annexe 71 de l'IEA).

**Groupe C, Les « Challengers Académiques » (L'Environnement Concurrentiel du LJG) :** Ce cluster, situé au centre et en bas de la matrice, constitue le périmètre de concurrence directe du Laboratoire Jacques Geelen. Il regroupe des structures fixes, opérant en climat réel, qui compensent des budgets moindres par des méthodologies d'analyse avancées.

- LECE (Espagne - CIEMAT) : Situé dans le désert de Tabernas, il tire parti d'un climat extrême (> 3000 heures de soleil/an). Bien que disposant de cellules PASLINK rotatives, son positionnement reste focalisé sur la caractérisation thermique des composants passifs et l'identification de systèmes.
- VERU (Allemagne - Fraunhofer IBP) : Cette installation se distingue par une flexibilité interne spécifique : la profondeur des cellules de test est ajustable de 4 à 12 mètres grâce à des parois arrière mobiles, permettant d'étudier l'éclairage naturel et la ventilation dans des configurations de bureaux profonds.
- INCAS (France - CEA/INES) : Composée de quatre maisons géométriquement identiques mais construites avec des matériaux différents (bloc béton, ossature bois, brique monomur), cette plateforme est spécialisée dans l'étude comparative de l'inertie thermique.
- Positionnement du Laboratoire Jacques Geelen : Le LJG s'inscrit pleinement dans ce groupe C. Son score sur l'axe "Infrastructure" (2.5/5) reflète sa nature hybride (cellule climatique insérée dans un bâtiment réel), offrant une précision supérieure à une simple maison témoin mais inférieure aux chambres climatiques de Salford. Son score moyen sur l'axe "Intelligence" (3/5) traduit un retard relatif sur l'IoT natif par rapport aux standards 2025 (comme le DTI et ses 700 capteurs), tout en conservant une pertinence forte sur la physique du bâtiment fondamentale.

Le tableau ci-dessous condense les données techniques certifiées ayant servi à l'élaboration de la matrice

<i>Infrastructure</i>	<i>Pays</i>	<i>Spécificité Technique Majeure</i>	<i>Capacité Chiffrée</i>
<i>FLEXLAB</i>	USA	Rotation du bâtiment entier	270° d'amplitude
<i>Energy House 2.0</i>	UK	Contrôle climatique extrême (Neige/Pluie)	-20°C à +40°C
<i>EnergyFlexLab</i>	DK	Densité instrumentale & Smart Grid	> 700 capteurs

<i>KUBIK</i>	ES	Reconfiguration structurelle totale	500 m <sup>2</sup> configurables
<i>Twin Houses</i>	DE	Comparaison stricte (Jumeaux monozygotes)	2 maisons identiques
<i>VERU</i>	DE	Géométrie variable (Profondeur)	4m à 12m de profondeur
<i>LECE</i>	ES	Climat semi-aride & PASLINK	> 3000 h soleil/an
<i>INCAS</i>	FR	Comparaison typologique (Inertie)	3 modes constructifs

Tableau 4 : Spécifications techniques comparées

La localisation des infrastructures du panel n'est pas anodine ; elle dicte en grande partie leur spécialisation scientifique. La performance d'un bâtiment étant intrinsèquement liée à son environnement extérieur, nous observons une segmentation géographique claire qui définit des "zones d'influence".

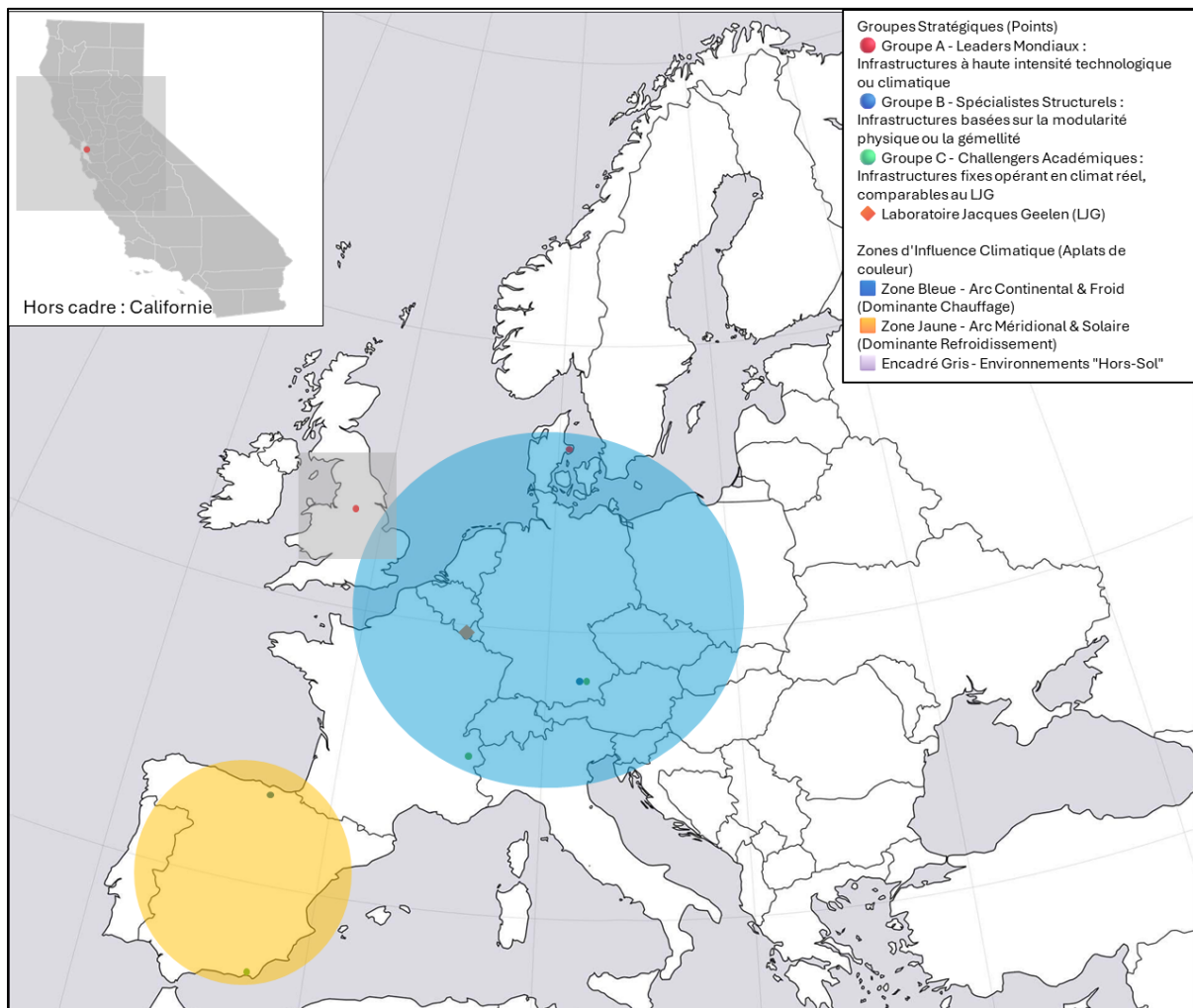


Figure 2 : Carte de répartition des infrastructures et zones climatiques

L'analyse spatiale révèle trois typologies d'environnements de test :

### 1. L'Arc Continental et Froid - Dominante Chauffage :

*Laboratoires* : Twin Houses & VERU (Allemagne), EnergyFlexLab (Danemark), INCAS (France - Savoie). Situés dans des zones à hivers marqués (Climat continental humide ou montagnard), ces laboratoires sont naturellement orientés vers l'isolation thermique lourde et le chauffage. Par exemple, le site de Holzkirchen (Fraunhofer) est choisi spécifiquement pour la sévérité de ses hivers. Le Laboratoire Jacques Geelen, avec son climat tempéré belge, se situe à la lisière de ce groupe, traitant des problématiques de chauffage mais avec une composante d'humidité océanique.

### 2. L'Arc Méridional et Solaire - Dominante Refroidissement :

*Laboratoires* : LECE (Espagne - Almería), KUBIK (Espagne - Bilbao). Le LECE opère dans une zone semi-aride unique en Europe (> 3000 heures de soleil/an), idéale pour tester les systèmes solaires et le confort d'été (climatisation). KUBIK, bien que sous climat océanique, travaille également fortement sur ces thématiques grâce à ses façades orientables.

### 3. Les Environnements "Hors-Sol" (Climat Artificiel) :

*Laboratoires* : Energy House 2.0 (UK), FLEXLAB (USA). Ces infrastructures s'affranchissent de la géographie. Energy House 2.0 peut simuler un blizzard arctique en plein été britannique grâce à ses chambres climatiques. Le FLEXLAB (Californie) utilise la rotation et la simulation pour recréer virtuellement d'autres climats.

En outre, Cette analyse montre que le LJG occupe une niche géographique pertinente : le climat océanique tempéré. Contrairement au LECE (trop chaud) ou au Fraunhofer (trop froid), le LJG est représentatif du climat de la majeure partie de l'Europe de l'Ouest (pluie, ciel couvert, hivers modérés), ce qui valide son utilité pour tester des solutions de rénovation adaptées au marché local massif.

## 2. Dimension 1 : Agilité et flexibilité infrastructurelle

Cette première dimension interroge la capacité physique de l'outil de recherche. Elle évalue si l'infrastructure permet d'étudier la complexité systémique d'un bâtiment ou si elle se limite à la caractérisation de composants isolés.

### *i. Typologie et Échelle : Le positionnement "Full-Scale"*

La classification des infrastructures de test repose sur le référentiel international établi par l'IEA dans le cadre de l'Annexe 58. Le rapport de la sous-tâche 1a « *Inventory of*

*full scale test cells and houses* » établit une distinction fondamentale entre deux catégories d'outils :

1. Les cellules de test de façade (Facade Field Test) : Structures de petite taille, souvent monozones, conçues pour la caractérisation stricte de composants d'enveloppe (valeur U, facteur solaire g) en minimisant les effets de bord. Les cellules PASLINK du laboratoire LECE en sont l'archétype.
2. Les Bâtiments en échelle réelle : Infrastructures reproduisant la complexité d'un bâtiment complet (multizone, interactions entre pièces, stratification de l'air) pour valider des performances globales. Ils regroupent les typologies suivantes : « cellule d'essai extérieure », « bâtiment d'essai », « essais en conditions réelles » (Janssens, s. d.-b).

L'analyse des caractéristiques techniques confirme l'appartenance du LJG à la catégorie des « Full-Scale Test Buildings ». Contrairement à une simple cellule de test focalisée sur un mur, le LJG dispose d'un bâtiment structuré en quatre zones thermiques distinctes (Chambre climatique, Zone tampon, Bureau, Local technique), reproduisant les interactions thermodynamiques d'un bâtiment réel.

Cette classification confère au LJG un avantage par rapport aux cellules de test du groupe C. Le LJG permet d'étudier des phénomènes impossibles à reproduire en cellule, tels que l'impact d'une zone tampon sur la consommation de la zone adjacente ou la stratification thermique sur une hauteur d'étage standard. Puis, là où une cellule PASLINK valide un composant (ex: un vitrage), le LJG valide un système complet (ex: l'interaction entre une pompe à chaleur, l'inertie du bâtiment et la ventilation).

En termes d'échelle, le LJG, avec sa configuration de maison individuelle, est directement comparable aux infrastructures de référence du Groupe B comme les Twin Houses du Fraunhofer IBP (deux maisons individuelles) ou aux maisons expérimentales de la plateforme INCAS (100 m<sup>2</sup> habitables). Il dépasse le stade du laboratoire de matériaux pour atteindre celui du laboratoire de systèmes, une condition sine qua non pour les recherches actuelles sur la rénovation globale et le pilotage intelligent.

### *ii. Agilité Structurelle : La rigidité face à l'hyper modularité*

La flexibilité structurelle définit la capacité d'une infrastructure à modifier sa géométrie ou la composition de son enveloppe pour s'adapter à de nouvelles questions de

recherche. Sur cet axe, la comparaison révèle un écart technologique significatif entre les structures cinétiques et le bâti fixe du LJG.

Les standards internationaux actuels, KUBIK, FLEXLAB, ont fait de la modularité architecturale leur cœur de métier.

- Approche "Meccano" : Le KUBIK repose sur une ossature métallique lourde permettant le démontage et le remplacement intégral des dalles et des façades sur trois niveaux, offrant une surface configurable jusqu'à 500 m<sup>2</sup>.
- Approche Cinétique : Le FLEXLAB américain pousse l'agilité jusqu'à la rotation du bâtiment entier sur 270 degrés, permettant de modifier l'orientation solaire d'une façade testée en quelques minutes.

En comparaison, le Laboratoire Jacques Geelen présente une structure figée. Construit en 2003 sur la base d'une ossature bois isolée, le bâtiment ne permet ni rotation, ni modification lourde de son enveloppe extérieure. Ses zones sont spatialement définies et fixes.

Cependant, l'observation des équipements révèle que la flexibilité du LJG s'est déplacée de l'architecture vers les systèmes techniques. Les infos mettent en évidence une conception modulaire des réseaux : la conception du banc d'essai (« Thermal Dummy ») offre une architecture « Plug-and-Play » permettant de reconfigurer les boucles hydrauliques et de connecter rapidement les équipements sans nécessiter de lourds travaux de plomberie. Le laboratoire dispose aussi d'une capacité à connecter diverses sources de production (PàC, solaire, chaudière) au banc d'essai grâce à une architecture hydraulique ouverte.

Cette agilité ne se lit pas sur le plan d'architecte, mais sur le synoptique des fluides. Comme l'illustre la figure ci-dessous, le laboratoire compense sa structure fixe par une capacité à router l'énergie entre une diversité de sources et de stockages, créant une sorte de matrice énergétique modulable à souhait.

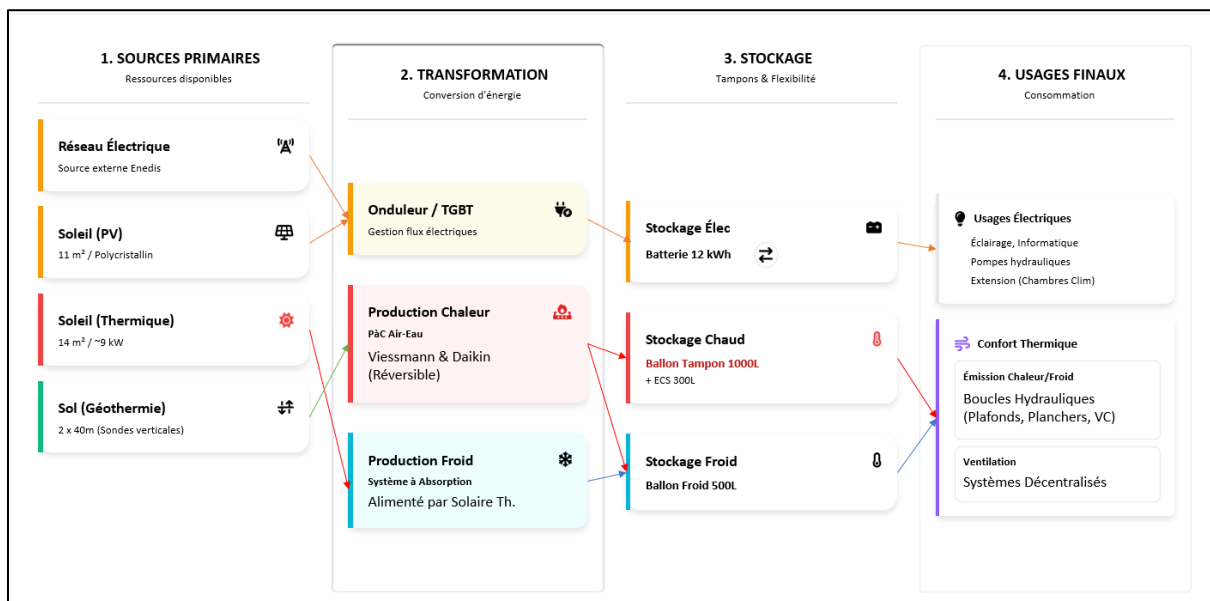


Figure 3 : Diagramme de Sankey des flux énergétiques du LJG. Illustration de la flexibilité systémique : multitude de sources (Géothermie, PV, Gaz) connectables aux différents vecteurs de stockage et de distribution.

Cette rigidité architecturale, si elle empêche le LJG de rivaliser avec KUBIK sur le prototypage de façades neuves, devient un atout pour la recherche sur la rénovation. La structure du LJG, représentative d'un bâtiment existant standard, offre un terrain d'expérimentation réaliste pour tester des stratégies d'amélioration de la performance sur le parc bâti existant, là où les structures hyper-modulaires sont parfois trop éloignées de la réalité constructive conventionnelle.

### iii. Synthèse et Scoring (IFS)

Au terme de cette analyse comparative, il apparaît que le Laboratoire Jacques Geelen adopte un positionnement de niche. S'il ne peut rivaliser avec l'hyper-modularité des infrastructures du Groupe B (KUBIK), il compense sa rigidité structurelle par une ingéniosité systémique.

Sur la base de l'échelle de maturité définie au Chapitre V (où 5/5 représente la modularité totale et 1/5 une structure figée et obsolète), le LJG se verrait attribuer la note de 2.5 / 5. Concernant les facteurs limitants, La structure portante en ossature bois est fixe et non-démontable, contrairement au KUBIK qui permet une reconfiguration spatiale complète. L'impossibilité de modifier l'orientation du bâtiment ou la composition lourde de l'enveloppe extérieure limite les capacités de prototypage architectural rapide. De plus, l'absence de mouvement ou rotation, un standard pour

le FLEXLAB, contraint les tests solaires aux conditions naturelles de l'azimut existant. Cependant, le laboratoire dépasse le statut de simple "bâtiment témoin" grâce à deux atouts majeurs identifiés dans la documentation technique :

1. La modularité des systèmes : L'utilisation documentée de "tuyauteries flexibles" (*flexible pipes*) et de dispositifs mobiles permet une reconfiguration rapide des boucles hydrauliques, offrant une agilité rare pour tester différents producteurs de chaleur (PAC, chaudière, solaire).
2. L'architecture "Boîte dans la boîte" : La présence de la chambre climatique interne de 50 m<sup>3</sup>, découplée de l'extérieur par une zone tampon, offre une flexibilité d'usage (création de climats artificiels) supérieure à une maison standard.

En outre, Avec un score de 2.5/5, le LJG se positionne comme une infrastructure semi-flexible. Il n'est pas conçu pour l'agilité architecturale, mais pour l'agilité systémique. Ce profil le disqualifie pour les tests de façades radicales, mais le qualifie idéalement pour la recherche sur la rénovation des équipements techniques et le pilotage énergétique.

### 3. Dimension 2 : Maitrise environnementale

La valeur scientifique d'un laboratoire ne réside pas seulement dans ses murs, mais dans sa capacité à produire des données fiables. Cette dimension évalue la qualité du signal expérimental, déterminée par la maîtrise des conditions aux limites et la précision de l'instrumentation.

#### *i. Stratégie de Sollicitation Climatique : Stabilité vs Chaos*

La fiabilité d'un test énergétique dépend de la capacité à distinguer la performance intrinsèque du système testé du "bruit" météorologique extérieur. Sur cet axe, le LJG adopte une stratégie singulière de régulation thermique. Contrairement aux laboratoires exposés directement aux intempéries (les Outdoor Test Cells), le LJG utilise sa zone tampon (Buffer Zone) comme un bouclier thermique dynamique. Cet espace périphérique d'environ un mètre de large, entourant la chambre climatique, est entièrement instrumenté et contrôlé. Cette architecture permet deux modes opératoires distinctifs :

- Quasi-Adiabatique : En régulant la température de la zone tampon pour qu'elle suive exactement celle de la chambre de test, le laboratoire annule les flux thermiques traversant les parois ( $\Delta T \approx 0$ ). Cela permet d'isoler parfaitement les gains internes ou la réponse d'un système de chauffage, sans perturbation extérieure.
- Gradient Forcé : Le laboratoire peut imposer une différence de température artificielle. Il est ainsi possible de simuler des conditions hivernales sévères (par exemple en maintenant la zone tampon à basse température) même si les conditions extérieures réelles sont clémentes.

Cette stratégie place le LJG dans une position intermédiaire :

Face au « Chaos » et à l'absolu. Le chaos car ces infrastructures (INCAS, Twin Houses, KUBIK), bien que sophistiquées, restent tributaires de la météo stochastique (aléatoire). Pour valider un système, elles doivent souvent attendre des conditions spécifiques ou recourir à des corrections mathématiques complexes. Le LJG, grâce à sa zone tampon, offre une répétabilité supérieure pour les tests de systèmes, car il peut stabiliser les conditions aux limites à la demande. Et l'absolu car le laboratoire de Salford Energy House 2.0 atteint la perfection du contrôle (neige, vent, pluie programmables). Le LJG ne peut rivaliser sur la simulation des précipitations ou du vent dynamique sur la façade. Cependant, pour la thermique pure, la méthode de la "Garde Thermique" du LJG offre une stabilité comparable à une fraction du coût énergétique et opérationnel d'une chambre climatique industrielle de 2400 m<sup>3</sup>.

En somme, la stratégie climatique du LJG privilégie la stabilité thermique sur le réalisme météorologique total (pluie/vent), un choix cohérent pour sa mission de caractérisation fine des équipements et des régulations.

### *ii. Densité Métrologique : La bataille de la granularité*

La qualité d'un modèle numérique dépend directement de la résolution spatiale des données utilisées pour sa validation. Dans cette "bataille de la granularité", le nombre absolu de capteurs importe moins que leur densité par mètre cube de volume testé.

Le laboratoire Jacques Geelen dispose d'une infrastructure de mesure massive pour son échelle. Le système de monitoring centralisé gère plus de 150 capteurs physiques connectés. Cette instrumentation couvre l'ensemble du spectre : sondes Pt100 et thermocouples pour la stratification de l'air et les températures de surface ; débitmètres

électromagnétiques et compteurs d'énergie sur chaque boucle de distribution (chauffage, refroidissement, ECS) ; pyranomètres pour le rayonnement solaire global et diffus, hygromètres capacitifs et analyseurs de CO<sub>2</sub>.

Si l'on compare ces chiffres aux standards du panel :

- EnergyFlexLab (Groupe A) : plus de 700 capteurs, mais répartis sur deux maisons complètes et un micro-réseau extérieur.
- KUBIK (Groupe B) : environ 400 capteurs pour une surface configurable de 500 m<sup>2</sup>.
- LJG (Groupe C) : >150 capteurs principalement sur la chambre climatique de 50 m<sup>3</sup> et ses systèmes associés.

Le LJG atteint une densité instrumentale remarquable d'environ 3 capteurs par m<sup>3</sup> de volume utile. Cette granularité élevée est supérieure à celle de nombreuses maisons expérimentales "Full-Scale" où les capteurs sont souvent plus dispersés. Elle permet au LJG de réaliser des bilans énergétiques avec une fermeture de bilan très précise, essentielle pour la validation de modèles complexes. Le laboratoire ne souffre donc pas vraiment de déficit métrologique face aux géants, il est au contraire assez focalisé.

### *iii. Métrologie Avancée : L'atout du "Facteur Humain"*

La performance d'un bâtiment se mesure aussi en confort perçu par l'occupant. Sur cet axe qualitatif, le Laboratoire Jacques Geelen dispose d'un avantage technologique par rapport à une partie du panel.

Alors que la majorité des infrastructures de test (comme les Twin Houses ou EnergyFlexLab) simulent la présence humaine par de simples convecteurs électriques ou des résistances chauffantes, le LJG utilise un instrument de recherche avancé, un mannequin thermique instrumenté nommé « OLE ». Cet équipement permet de dépasser la simple mesure de la température ambiante pour évaluer le confort thermique local. Il quantifie des paramètres physiologiques subtils tels que l'asymétrie de rayonnement ou les courants d'air au niveau des chevilles, indispensables pour valider la conformité aux normes de confort strictes comme l'**ISO 7730** (indices PMV/PPD).

La possession de cet outil place le LJG dans le cluster supérieur pour l'analyse du confort, aux côtés des leaders mondiaux :

- Le LJJ rejoint ici les capacités de KUBIK (qui utilise des mannequins respirants) et du FLEXLAB (qui les utilise pour des études de ventilation et d'aérosols). Il démontre qu'une structure académique peut rivaliser avec des centres nationaux sur des niches métrologiques pointues.
- Il se distingue nettement des autres challengers du Groupe C (comme les cellules PASLINK du LECE), qui sont des outils de physique du bâtiment pure focalisés sur les flux thermiques pariétaux, mais inadaptés à l'évaluation fine du ressenti humain.

En intégrant cette dimension physiologique, le LJJ ne se contente pas de valider l'efficacité énergétique des systèmes mais aussi de valider leur acceptabilité par l'utilisateur, un critère devenu central dans les stratégies de rénovation durable.

#### *iv. Synthèse et scoring (IME)*

L'analyse de la seconde dimension révèle que la valeur ajoutée du Laboratoire Jacques Geelen ne réside pas dans la puissance brute de ses installations climatiques, mais dans la finesse de sa métrologie. En privilégiant la stabilité thermique et l'analyse du confort, il compense l'absence de générateurs climatiques lourds. Donc sur l'échelle de maturité définie (où 5/5 = le contrôle climatique absolu type Salford ; 1/5 = une mesure *in situ* sans instrumentation avancée), le Laboratoire Jacques Geelen obtiendrait la note de 3.5 / 5.

Le laboratoire ne peut prétendre à la note maximale détenue par Energy House 2.0 car il ne maîtrise pas l'intégralité des paramètres météorologiques. L'absence de générateurs de précipitations et de simulateurs de vent dynamique sur l'enveloppe limite son champ d'action. De plus, le volume contrôlé reste modeste comparé aux chambres climatiques industrielles, restreignant l'étude des interactions aérodynamiques complexes entre étages. Le score dépasse la moyenne standard grâce à trois différenciateurs technologiques majeurs validés par l'inventaire technique :

- La stabilité thermique active : Le pilotage de la zone tampon permet de s'affranchir des perturbations extérieures pour réaliser des tests en conditions quasi-adiabatiques, offrant une répétabilité supérieure aux simples maisons témoins comme pour l'INCAS.

- La densité métrologique : Avec >150 capteurs concentrés sur un volume utile réduit, le laboratoire offre une résolution spatiale des données (granularité) comparable aux meilleurs standards de recherche.
- L'instrumentation physiologique : La présence du mannequin thermique OLE permet d'intégrer la dimension du confort humain (ISO 7730) avec une précision que les laboratoires purement thermiques n'atteignent pas.

Avec un score de 3.5/5, le LJJ se qualifie comme un laboratoire de précision. S'il renonce à simuler les tempêtes, il excelle dans l'analyse fine des ambiances intérieures et la validation de systèmes, ce qui constitue son avantage concurrentiel principal face aux structures plus vastes mais parfois moins agiles métrologiquement.

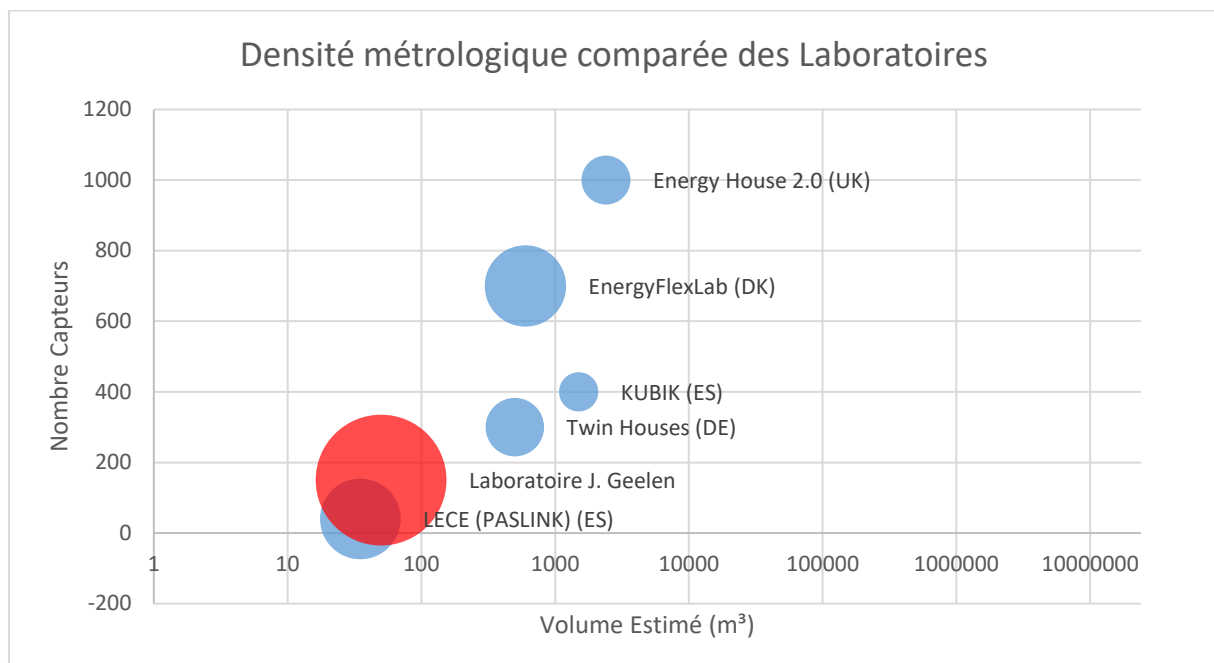


Figure 4 : Analyse de la densité métrologique comparée (Volume vs Instrumentation).

Sur cette figure, la taille des bulles est proportionnelle à la densité de capteurs par mètre cube (C/m<sup>3</sup>). Bien que le LJJ (en rouge) présente un volume modeste (Axe horizontal) comparé aux infrastructures industrielles comme Energy House 2.0, il se distingue par la plus forte densité métrologique du panel (Bulle la plus large : 3.0 C/m<sup>3</sup>). Cela démontre une stratégie de « Haute Résolution » sur un volume contrôlé, par opposition à la stratégie de grand volume à résolution standard des autres leaders.

## 4. Dimension 3 : Maturité Cyber-Physique

Au-delà de l'infrastructure physique, la recherche moderne exige une intégration poussée entre le bâtiment réel et ses jumeaux numériques. Cette dimension évalue l'intelligence du laboratoire : sa capacité à dialoguer avec des modèles de simulation et à émuler des phénomènes complexes.

### *i. Hybridation Réel-Virtuel : La technique du « Hardware-in-the-Loop »*

La technique du Hardware-in-the-Loop représente le summum de l'expérimentation énergétique. Elle consiste à coupler un équipement physique réel (le hardware) à un environnement virtuel simulé en temps réel (le "loop").

Le LJG est pour cette hybridation. L'infrastructure intègre une connexion bidirectionnelle entre le bâtiment physique et le logiciel de simulation dynamique TRNSYS. Concrètement, cela permet d'isoler un composant critique, comme une pompe à chaleur ou une chaudière, et de le tester sur un banc d'essai hydraulique flexible (le "Thermal Dummy"). Le logiciel de simulation calcule en temps réel les besoins thermiques d'un bâtiment virtuel. Il envoie cette consigne de puissance au banc d'essai physique. L'équipement réel (la PàC) doit fournir cette puissance. Sa réponse réelle est mesurée et renvoyée au modèle numérique pour la prochaine étape de calcul.

Cette capacité confère au laboratoire une puissance d'investigation scientifique rare en permettant de s'affranchir des contraintes spatio-temporelles. Il devient ainsi possible de tester la performance d'une machine face à des climats ou des typologies de bâtiments qui n'existent pas physiquement sur le campus d'Arlon. De plus, la technique permet de comprimer les séquences climatiques virtuelles pour simuler une saison de chauffe complète en quelques jours, là où un test passif imposerait d'attendre les conditions hivernales réelles. Sur cet axe technologique, le LJG surpasse nettement les laboratoires de monitoring passif du Groupe C qui se limitent à l'observation du comportement d'un bâtiment existant. En offrant une plateforme de validation robuste pour les algorithmes de commande prédictive, l'infrastructure se rapproche des standards définis par le FLEXLAB américain, considéré comme le leader mondial de la simulation hybride.

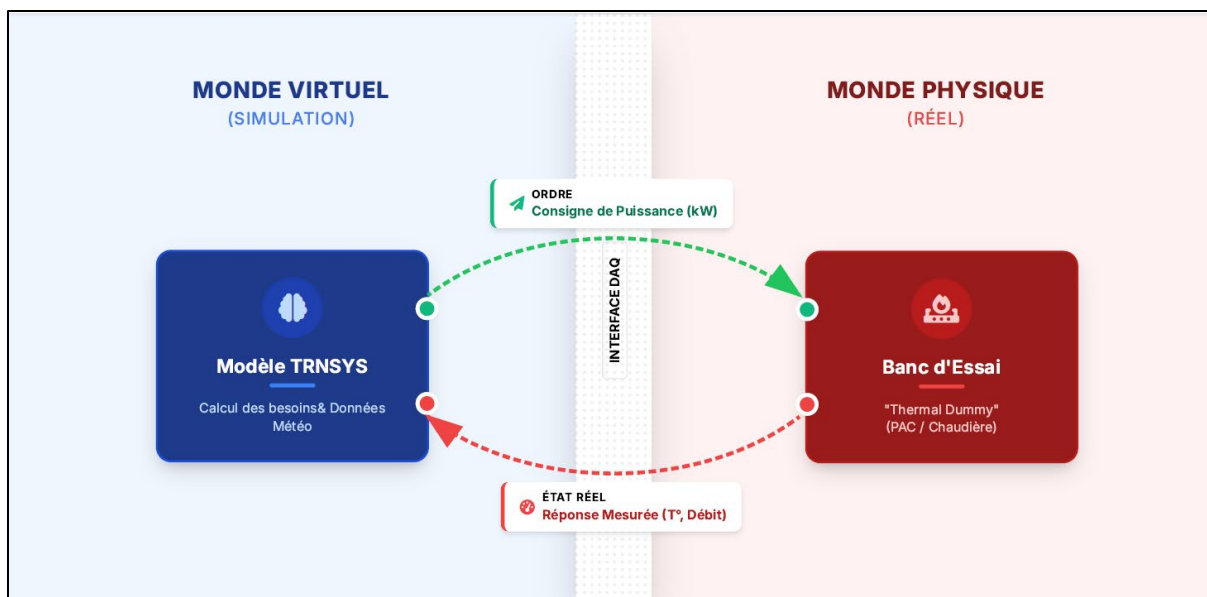


Figure 5 : Schéma de principe de l'hybridation Hardware-in-the-Loop (HIL) au LJG.

Le modèle numérique (TRNSYS) pilote en temps réel l'équipement physique via le banc d'essai modulaire ("Thermal Dummy"), permettant de tester des scénarios virtuels sur des machines réelles. Ce couplage bidirectionnel, schématisé ci-dessus, permet de briser la barrière du temps et de l'espace : le laboratoire peut ainsi tester la réaction d'une pompe à chaleur réelle face à une vague de froid virtuelle simulée à Oslo, sans quitter le campus d'Arlon.

## ii. *Émulation Scénarisée : Remplacer l'aléatoire humain par l'algorithme*

Dans l'expérimentation « Full-Scale », le comportement des occupants (ouverture des fenêtres, production de chaleur métabolique, usage de l'eau...) constitue souvent la principale source d'incertitude stochastique, rendant la comparaison de deux stratégies énergétiques hasardeuse. Pour pallier ce biais, le Laboratoire Jacques Geelen a opté pour une stratégie d'émulation déterministe.

Pour simuler la vie intérieure sans dépendre d'occupants réels ou de scénarios statiques simplistes, le laboratoire déploie un arsenal technologique piloté par algorithme. Ce dispositif gère d'abord les gains thermiques via des bancs de résistances électriques modulantes qui reproduisent la chaleur dégagée par le métabolisme humain et les appareils électroménagers selon des profils dynamiques. Parallèlement, la gestion des gains latents est assurée par des humidificateurs à ultrasons injectant la vapeur d'eau associée aux activités quotidiennes, ce qui permet

d'évaluer la réponse hygrométrique des matériaux. Enfin, la pollution intérieure est émulée par un système d'injection massive de dioxyde de carbone simulant la respiration, un outil essentiel pour valider les stratégies de ventilation à la demande lors de pics de présence virtuels.

Cette infrastructure permet d'exécuter des « scénarios de vie » standardisé. L'avantage scientifique est majeur face aux expérimentations in situ classiques : il devient possible de rejouer exactement la même journée type pour tester deux systèmes de régulation différents. Cette répétabilité parfaite permet d'isoler l'impact de la technologie testée avec une certitude statistique que les laboratoires habités ne peuvent offrir.

### *iii. Limites de l'Intelligence : Le fossé du « Smart Grid »*

Si le Laboratoire Jacques Geelen excelle dans le pilotage local, l'analyse comparative révèle un retard technologique sur la dimension de l'interaction avec le réseau. Alors que les leaders du panel, tels que l'EnergyFlexLab danois, positionnent le bâtiment comme un nœud actif du réseau électrique intégrant batteries de grande capacité et bornes de recharge bidirectionnelles, le LJG conserve le profil d'une maison connectée isolée. L'inventaire technique compte la présence récente d'une batterie domestique de 12 kWh couplée aux panneaux photovoltaïques, mais son usage demeure limité à une logique d'autoconsommation standard gérée par l'onduleur commercial. Ce cloisonnement technique s'apparente à une approche en boîte noire : le stockage n'est pas pleinement intégré à la boucle de contrôle du laboratoire, faute d'interface ouverte permettant au superviseur central de forcer des charges ou décharges selon des scénarios de recherche complexes. La batterie est ainsi physiquement présente, mais reste inopérante pour l'expérimentation sur les réseaux intelligents.

L'audit de l'architecture numérique révèle une fragmentation critique. Le schéma suivant matérialise ce "goulot d'étranglement" : alors que les capteurs historiques remontent vers le superviseur central, les nouveaux vecteurs de flexibilité (batterie, bornes) restent en périphérie, isolés par des protocoles propriétaires non unifiés.

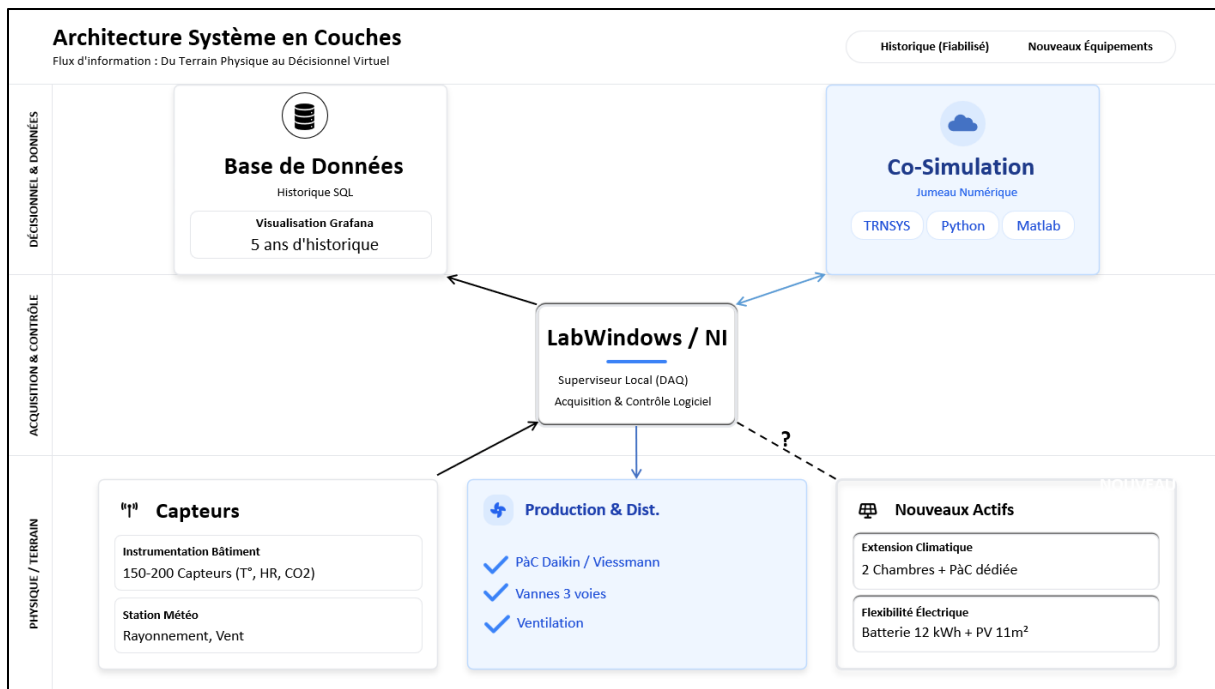


Figure 6 : Architecture Cyber-Physique actuelle du LJG

Mise en évidence de la centralisation via LabWindows et du cloisonnement des nouveaux actifs qui freine l'interopérabilité Smart Grid.

Cette limitation confine les expérimentations du LJG à l'optimisation de l'autoconsommation individuelle. Contrairement aux laboratoires du Groupe A, il ne permet pas encore de tester physiquement des scénarios de délestage réseau ou de services systèmes (réglage de fréquence), qui constituent pourtant la frontière actuelle de la recherche énergétique européenne.

#### iv. Synthèse et scoring (IMCP)

L'analyse de la dimension cyber-physique révèle un laboratoire à deux vitesses : extrêmement avancé sur le pilotage local et l'hybridation numérique, mais en retrait sur l'intégration physique aux réseaux énergétiques de demain.

Sur l'échelle de maturité cyber-physique, le Laboratoire Jacques Geelen obtient un score de 3 sur 5. Cette notation traduit une dualité entre des capacités de simulation avancées et des limitations en matière d'intégration réseau. Le score est principalement contraint par un défaut d'interopérabilité des vecteurs de flexibilité : bien que la batterie soit installée, son pilotage reste verrouillé par des protocoles propriétaires qui empêchent la mise en œuvre de scénarios complexes comme les centrales virtuelles, tandis que l'absence de bornes de recharge bidirectionnelles

constitue un manque face aux standards actuels. En contrepartie, le laboratoire démontre une expertise indéniable dans la simulation hybride. Son architecture HIL native permet un couplage temps réel avec le logiciel TRNSYS pour l'essai d'équipements thermiques, et sa capacité d'émulation déterministe des occupants via l'injection contrôlée de flux physiques garantit une répétabilité expérimentale rare. Ainsi, le LJG se positionne comme un laboratoire de simulation hybride, techniquement mature pour l'optimisation du bâtiment intelligent mais devant encore évoluer pour intégrer pleinement les problématiques du réseau intelligent.

## 5. Dimension 4 : Rayonnement et productivité scientifique

La pertinence d'une infrastructure peut certes se mesurer à la sophistication de ses machines, mais également à la portée des travaux qu'elle permet de réaliser. Cette dimension a pour but d'évaluer l'intégration du laboratoire dans la communauté scientifique mondiale et sa capacité à influencer les standards de l'industrie.

### *i. Ancrage International : L'effet de levier des réseaux IEA*

Le marqueur le plus significatif de la pertinence scientifique du LJG est sa participation aux programmes de l'IEA, spécifiquement au sein du programme EBC.

Loin d'évoluer en périphérie, le laboratoire s'est positionné au cœur du développement des méthodologies modernes de caractérisation énergétique en participant activement aux travaux des Annexes 58 et 71. Ce rôle clé a permis de soumettre les infrastructures et méthodes de mesure à l'évaluation critique d'instituts européens de premier plan tels que le Fraunhofer IBP, la KU Leuven ou le DTU. Au-delà d'une simple validation par les pairs, cette contribution signifie que les données produites à Arlon ont servi à l'établissement de protocoles expérimentaux désormais utilisés mondialement, conférant au laboratoire un statut de co-auteur de la norme scientifique plutôt que de simple utilisateur. Cet ancrage au sein des réseaux de l'IEA agit comme un véritable multiplicateur de puissance, offrant à la structure une certaine visibilité par rapport à sa taille physique. Contrairement à de nombreux laboratoires universitaires cantonnés à une diffusion locale, le LJG bénéficie d'une interopérabilité scientifique qui rend ses résultats directement comparables aux standards comme les Twin Houses ou les cellules PASLINK. Cette aptitude à s'intégrer dans des études croisées et à maîtriser

le langage scientifique des leaders du secteur constitue un atout majeur, garantissant la pertinence des recherches menées pour la scène internationale.

### *ii. Productivité Académique : La fabrique de chercheurs*

Si le Laboratoire Jacques Geelen ne dispose pas des budgets de fonctionnement illimités des centres privés, il compense par une ressource renouvelable à haute valeur ajoutée qui est la recherche académique. L'historique du laboratoire montre qu'il fonctionne comme un véritable incubateur scientifique. En étant adossé à l'Université de Liège, le LJG transforme ses activités de monitoring en supports pédagogiques et doctoraux.

- La production de thèses : Le laboratoire alimente un flux régulier de doctorats (PhD) et de travaux de fin d'études. Contrairement à un laboratoire de certification commerciale qui produit des rapports confidentiels, le LJG produit de la connaissance publique.
- L'effet multiplicateur : Chaque chercheur ou étudiant contribue à affiner les modèles, à coder de nouveaux modules de simulation ou à analyser des jeux de données massifs que le personnel permanent ne pourrait traiter seul.

Cette structure confère au LJG une certaine agilité intellectuelle. Là où des structures comme Energy House 2.0 doivent rentabiliser leurs équipements par des tests industriels rapides, le LJG peut se permettre des études longitudinales sur plusieurs années, grâce aux thèses notamment, approfondissant des sujets complexes comme le confort adaptatif ou l'hybridation des systèmes, créant donc une expertise de fond reconnue par la communauté académique.

### *iii. La capacité à capter des fonds*

La pérennité d'une infrastructure de recherche dépendant de son aptitude à évoluer face aux appels à projets compétitifs, Le LJG fait preuve d'une résilience thématique remarquable qui montre sa capacité à capter des financements régionaux et européens. Historiquement centré sur la physique de l'enveloppe, le LJG a réussi son pivot stratégique vers les systèmes énergétiques complexes. Cette mutation s'illustre par des projets récents tels que LOCOMOTRICE, où l'activité s'étend désormais de la métrologie thermique classique à la gestion des données de comptage intelligent et aux communautés d'énergie renouvelable. Ce glissement de la thermodynamique vers la science des données atteste de la pertinence continue de l'outil face aux enjeux de

2025, malgré son ancienneté relative. De surcroît, la localisation arlonaise est exploitée comme un levier pour intégrer la dynamique de la Grande Région à travers les projets Interreg. Cette dimension transfrontalière transforme le statut de la structure : au-delà de son ancrage local, elle est reconnue comme une plateforme technique apte à porter des partenariats internationaux. Pour les bailleurs de fonds, cette expérience de gestion européenne offre une garantie de crédibilité essentielle afin de soutenir les futurs investissements requis par la transition vers les réseaux intelligents.

#### *iv. Synthèse et scoring (IRS)*

L'analyse de cette dimension immatérielle confirme que l'intégration stratégique au sein des réseaux d'excellence compense la taille physique modeste du Laboratoire Jacques Geelen, le positionnant comme un nœud actif du tissu scientifique européen. Sur l'échelle de rayonnement scientifique, l'infrastructure obtient un score de 3,5 sur 5. Cette évaluation traduit une réalité contrastée : si la structure ne peut prétendre au leadership mondial absolu des grands instituts nationaux tels que le CSTB ou le Fraunhofer, sa force de frappe en volume de publications et de brevets restant contrainte par la taille de l'équipe académique, elle bénéficie néanmoins d'une reconnaissance qualitative majeure. Le score est tiré vers le haut par la participation aux Annexes 58 et 71 de l'Agence Internationale de l'Énergie, accomplissement qui atteste d'une crédibilité méthodologique de classe mondiale pour la définition des standards internationaux. De plus, la capacité à générer continuellement des thèses et à piloter des projets européens démontre une vitalité intellectuelle et une attractivité partenariale supérieures à la moyenne universitaire. En somme, le LJJ se définit comme un laboratoire expert connecté qui a réussi à convertir ses contraintes budgétaires en opportunités collaboratives pour valider sa pertinence scientifique.

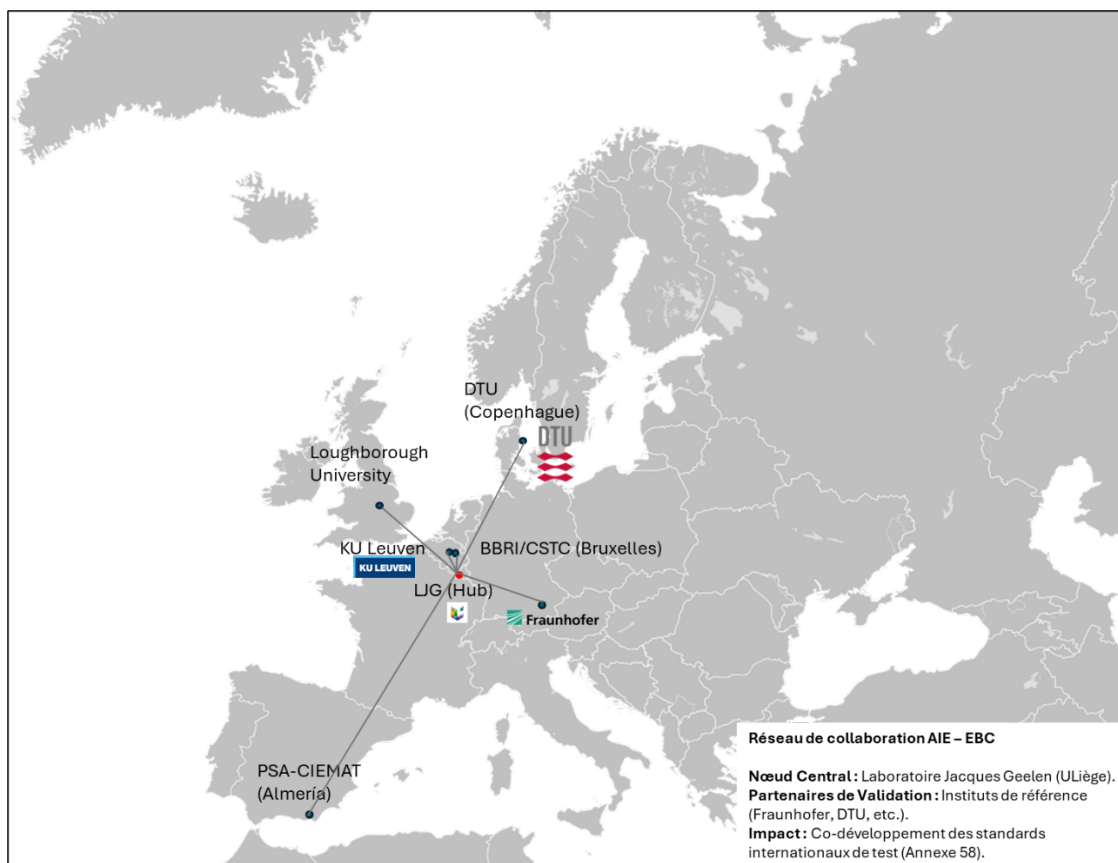


Figure 7 : La Carte des Partenariats Stratégiques

Cette cartographie illustre l'intégration du LIG dans l'écosystème de recherche européen. Malgré sa taille critique modeste, le laboratoire agit comme un nœud actif au sein du réseau d'excellence de l'Agence Internationale de l'Énergie, garantissant une pertinence scientifique alignée sur les standards mondiaux.

## 6. Dimension 5 : Trajectoire et Résilience

Enfin, la dernière dimension étudiée pour cette analyse aborde la question de la pérennité. Partant du principe que la valeur d'une infrastructure de recherche ne se juge pas uniquement à l'instant T mais sur sa capacité à rester pertinente à travers le temps, cet axe évalue la durabilité du laboratoire et son aptitude à s'adapter aux nouveaux paradigmes énergétiques en dépit du vieillissement de son bâti.

### *i. Le Paradoxe de l'Obsolescence*

Construit en 2003 comme énoncé plus tôt, le LIG pourrait apparaître techniquement dépassé face aux infrastructures récentes du panel telles que l'Energy House 2.0 inaugurée en 2022. Cependant, cette ancienneté constitue paradoxalement son atout majeur au regard de la politique énergétique européenne actuelle. La priorité de la

Commission Européenne, matérialisée par le Green Deal, s'est en effet massivement déplacée de la construction neuve vers la rénovation du parc existant. Dans ce contexte, si les laboratoires neufs représentent un idéal de construction zéro énergie ne concernant qu'une fraction marginale du parc immobilier, le LJG incarne physiquement la réalité du bâti à rénover massivement d'ici 2050 grâce à ses standards d'isolation datés et son étanchéité à l'air perfectible. Cette représentativité fait de l'infrastructure un candidat idéal pour l'expérimentation des stratégies de rénovation profonde.

Là où un laboratoire hyper-étanche ne permettrait pas de mesurer l'impact significatif d'une nouvelle technique d'isolation ou d'un algorithme de détection de fuites, le LJG offre un terrain réaliste pour valider des sauts de performance, comme le passage de la classe C à la classe A. Ainsi, l'âge du bâtiment ne doit pas être interprété comme une dette technique mais comme une fonctionnalité de recherche : il agit tel un patient témoin sur lequel tester des remèdes, contrairement aux laboratoires neufs qui s'apparentent davantage à des athlètes olympiques déjà optimisés.

## *ii. La capacité de « Pivot »*

La résilience d'une infrastructure se mesure à sa plasticité fonctionnelle, soit sa faculté à répondre aux questions de recherche de 2025 avec un bâtiment conçu plus de 20 ans plus tôt. L'historique du LJG démontre cette capacité rare à réorienter ses axes de travail sans reconstruction lourde, à travers trois phases d'évolution qui prouvent son alignement avec les tendances du marché. Initialement focalisé sur la physique statique de l'enveloppe et la création de brouillard dans les années 2000, le laboratoire a ensuite pivoté vers la dynamique des systèmes durant la décennie suivante. Grâce à sa flexibilité hydraulique, il s'est transformé en banc d'essai pour les interactions complexes entre pompes à chaleur, solaire thermique et régulation, délaissant la simple observation pariétale. Aujourd'hui, bien que le bâti soit ancien, l'ajout de nouveaux outils comme le mannequin thermique et le recours à l'hybridation numérique marquent l'entrée dans l'ère de la donnée et de l'humain, permettant d'aborder des thématiques contemporaines telles que le confort adaptatif et l'intégration aux communautés d'énergie illustrée par le projet LOCOMOTRICE.

Cette agilité prouve que la valeur du LJG ne réside plus dans son "Contenant" soit la charpente bois, mais dans son "Contenu" ; les boucles de régulation et les algorithmes. Le laboratoire a réussi à découpler son obsolescence immobilière de sa pertinence

scientifique. C'est une preuve de robustesse conceptuelle : alors que des infrastructures trop spécialisées (comme certaines cellules de test de matériaux purs) sont devenues inutiles une fois le matériau caractérisé, la polyvalence du LJG lui permet d'absorber de nouveaux sujets comme l'intelligence artificielle ou le pilotage prédictif.

### *iii. Le Cycle de Vie*

Bien que le bâtiment ait démontré sa résilience intellectuelle, l'analyse matérielle signale qu'il atteint désormais un point de bascule critique dans son cycle de vie. Après plus de deux décennies d'exploitation intensive, l'infrastructure affronte une dette technologique qu'il devient urgent de solder afin de maintenir sa compétitivité face aux standards de 2030. Ce diagnostic place l'infrastructure à la croisée des chemins, révélant un fossé qui se creuse non pas sur le plan du génie civil, mais au niveau de la couche matérielle. La comparaison avec les leaders du secteur met en exergue des déficits capacitaires qui risquent de bloquer les futures recherches. Premièrement, alors que la gestion de la flexibilité réseau devient centrale, l'absence de dispositifs de stockage électrochimique prive le laboratoire de la possibilité de tester des stratégies de stockage massif. Deuxièmement, le vide constaté en matière d'électromobilité, caractérisé par le manque de bornes de recharge bidirectionnelles, empêche toute participation aux recherches sur l'intégration des véhicules électriques au bâtiment, pourtant prioritaires en Europe. Enfin, une obsolescence métrologique guette l'installation : bien que dense, une partie du parc de capteurs et d'automates remonte à l'origine de la construction, impliquant qu'un renouvellement progressif de la chaîne d'acquisition sera nécessaire pour garantir le maintien d'une précision conforme aux exigences de l'Agence Internationale de l'Énergie.

Le laboratoire ne peut plus se satisfaire d'une simple prédisposition à l'intelligence ; il doit désormais l'intégrer nativement. La pérennité de l'outil pour la décennie 2025-2035 conditionne sa capacité à opérer une seconde mise à niveau technologique majeure, qui consiste à injecter une nouvelle couche comprenant l'IoT, le stockage et les infrastructures de recharge sur le bâti existant. En l'absence de cet investissement de modernisation, la structure court le risque de se voir cantonnée aux études thermiques traditionnelles, s'excluant de facto des opportunités de financement liées aux réseaux intelligents et à la flexibilité énergétique.

#### *iv. Synthèse et scoring (ITR)*

L'analyse temporelle révèle une infrastructure à la croisée des chemins : bien qu'elle ait brillamment réussi ses mutations passées, prouvant la robustesse de sa conception initiale, elle fait aujourd'hui face à une nécessité de mise à jour matérielle. Sur l'échelle de trajectoire et de résilience, le LJG obtient ainsi la note de 3 sur 5. Cette évaluation en demi-teinte sanctionne une usure matérielle caractérisée par une dette technologique accumulée sur le plan matériel.

L'absence d'équipements cruciaux pour la transition énergétique actuelle, tels que le stockage électrochimique ou les bornes de recharge bidirectionnelles, couplée au vieillissement physique naturel de l'enveloppe, limite sa capacité à rivaliser avec les laboratoires nativement conçus pour les réseaux intelligents et impose un investissement en capital pour franchir la prochaine décennie.

Néanmoins, le score se maintient à un niveau solide grâce à une forte pertinence contextuelle. Dans une Europe focalisée sur la rénovation thermique, disposer d'un bâtiment de 2003 dans son état d'origine s'avère scientifiquement plus pertinent pour tester des scénarios de rénovation que l'usage d'un bâtiment neuf parfait. De plus, sa capacité historique à intégrer de nouvelles couches logicielles sans modifier le gros œuvre atteste d'une excellente résilience fonctionnelle.

En définitive, le LJG se définit davantage comme une plateforme de rénovation évolutive : il n'est pas l'outil du futur pour la construction neuve, mais l'outil du présent pour la rénovation du parc existant, à la condition expresse de bénéficier d'une mise à jour technologique ciblée.

## VII. Positionnement et diagnostic stratégique

### 1. Synthèse comparative globale : Matrice de scoring

L'évaluation qualitative menée précédemment a permis d'identifier les caractéristiques intrinsèques du Laboratoire Jacques Geelen. Pour objectiver son positionnement stratégique, il est nécessaire de confronter ces résultats à l'ensemble du panel européen identifié dans l'état de l'art.

#### *i. Grille de calibrage*

Comme expliqué plus tôt dans la méthodologie, les données qualitatives extraites des sources documentaires ont été converties en scores quantitatifs (échelle de 1 à 5).

Cette conversion repose sur un référentiel de critères fixes, défini spécifiquement pour cette étude, mais établi à partir des informations apportées par l'annexe 58 de l'IEA. Chaque note correspond à un palier technologique observable, permettant de classer les laboratoires selon leur niveau de fonctionnalité et non selon une appréciation subjective.

NOTE	1. FLEXIBILITE (IFS)	2. ENVIRONNEMENT (IME)	3. CYBER-PHYSIQUE (IMCP)	4. RAYONNEMENT (IRS)	5. RESILIENCE (ITR)
1	Structure Figée	Exposition Incontrôlée	Monitoring Passif	Usage Interne	Obsolescence
3	Structure Adaptable	Contrôle Partiel	Pilotage Actif / HIL	Réseau Européen	Maturité (Mid-Life)
5	Modularité Totale	Contrôle Total	Smart Grid Native	Leadership Mondial	État de l'Art

Tableau 5 : Grille de définition des scores par dimension

#### *ii. Matrice comparative globale*

L'application de la grille de calibrage définie ci-dessus à l'ensemble du panel permet de dresser une cartographie quantitative des forces en présence. Pour faciliter l'analyse, les laboratoires ont été regroupés en trois catégories selon leur niveau de maturité technologique et leur positionnement sur le marché.

Groupe & Structure	1. Flexibilité (IFS)	2. Environnement (IME)	3. Cyber-Physique (IMCP)	4. Rayonnement (IRS)	5. Résilience (ITR)	Moyenne
GROUPE A : Les Leaders "High Tech"						
1. FLEXLAB (LBNL - USA)	5.0	4.0	5.0	5.0	5.0	<b>4.8</b>
2. Energy House 2.0 (Salford - UK)	4.0	5.0	4.5	4.5	5.0	<b>4.6</b>
3. EnergyFlexLab (DTU - DK)	4.0	3.0	5.0	4.0	4.5	<b>4.1</b>
GROUPE B : Les Références Européennes						
4. KUBIK (Tecnalia - ES)	5.0	3.0	4.0	4.0	4.5	<b>4.1</b>
5. Twin Houses (Fraunhofer - DE)	2.0	3.0	2.5	5.0	2.5	<b>3.0</b>
6. INCAS (INES - FR)	2.0	3.0	2.5	4.0	3.0	<b>2.9</b>
GROUPE C : Les Challengers (Panel LJG)						
7. PSA-LECE (CIEMAT - ES)	2.0	3.5	2.5	4.0	3.0	<b>3.0</b>
8. VERU (Fraunhofer - DE)	2.0	3.5	2.5	3.0	3.0	<b>2.8</b>
9. LJG (ULiège - BE)	2.5	3.5	3.0	3.5	3.0	<b>3.1</b>
<b>MOYENNE DU PANEL</b>						
	<b>3.1</b>	<b>3.4</b>	<b>3.4</b>	<b>4.1</b>	<b>3.7</b>	<b>3.5</b>

Tableau 6 : Matrice de Scoring des 9 Infrastructures

### Lecture Stratégique des Groupes :

1. Le Groupe A (Moyenne > 4.0) : Constitue l'élite mondiale actuelle. Ces laboratoires disposent des équipements natifs pour le Smart Grid et la flexibilité totale. Ils fixent la barre de l'excellence.
2. Le Groupe B : Comprend des références incontournables comme le Fraunhofer. Bien que techniquement moins agiles que le Groupe A (scores IFS/ITR plus bas), ils compensent par un rayonnement scientifique maximal.
3. Le Groupe C (Moyenne ~3.0) : C'est le cluster dans lequel évolue le Laboratoire Jacques Geelen. Avec un score de 3.1, le LJG se positionne en tête de ce groupe, devançant légèrement des structures comparables grâce à sa polyvalence méthodologique, mais reste logiquement en retrait face à la puissance financière du Groupe A.

#### *iii. Justification analytique du LJG*

L'analyse de la matrice met en évidence que le Laboratoire Jacques Geelen ne se contente pas de suivre la moyenne du panel, mais présente un profil asymétrique caractérisé par des points forts méthodologiques compensant des limitations structurelles.

Sur l'axe de la maîtrise environnementale, le laboratoire surperforme la moyenne de son groupe avec un score de 3,5 sur 5, dépassant même des références historiques telles que les Twin Houses. Ce résultat est légitimé par une architecture singulière intégrant une zone tampon au sud. Cet espace offre une capacité de modulation climatique précieuse, permettant une régulation passive ou active de la température

adjacente que les infrastructures purement exposées à l'extérieur ne possèdent pas. Cette configuration confère ainsi au LJG une polyvalence expérimentale supérieure aux standards classiques en extérieur.

Sur l'axe de la maturité cyber-physique, le laboratoire se distingue de nombre de ses homologues de la génération 2000-2010, souvent cantonnés au monitoring passif, en atteignant la note de 3 sur 5. Ce positionnement valide l'intégration effective des techniques d'émulation matérielle (Hardware-in-the-Loop) et de simulation dynamique au sein des protocoles récents, marquant une évolution réussie d'un simple outil de mesure physique vers une plateforme de validation hybride alliant le virtuel et le réel. La notation demeure néanmoins plafonnée par l'absence d'infrastructures lourdes dédiées aux réseaux intelligents, telles que les systèmes de stockage massif ou les bornes de recharge bidirectionnelles, qui constituent aujourd'hui l'apanage des leaders du Groupe A.

Sur l'axe de la flexibilité structurelle, le laboratoire marque le pas face aux infrastructures totalement modulaires telles que le KUBIK. La note de 2,5 sur 5 sanctionne objectivement la rigidité inhérente à l'enveloppe en ossature bois fixe. Si l'agilité des réseaux hydrauliques permet de compenser partiellement cette inertie et d'éviter une évaluation minimale, l'impossibilité de reconfigurer la géométrie des volumes ou de modifier la composition des parois demeure le facteur limitant majeur de l'infrastructure actuelle.

Au terme de cette évaluation, le Laboratoire Jacques Geelen se définit comme une entité experte et agile. Bien qu'il ne dispose pas de la puissance de feu massive propre aux leaders mondiaux, l'intelligence de sa conception, qui associe zone tampon et simulation hybride, lui permet de délivrer des résultats d'une qualité scientifique bien supérieure à ce que sa simple échelle physique laisserait présager.

## 2. Signature morphologique

La figure ci-dessous superpose le profil du LJG aux tendances du marché européen. Pour assurer la lisibilité et la pertinence stratégique, trois courbes distinctes ont été tracées :

1. Le Profil LJG (Ligne Rouge) : Représente les scores spécifiques obtenus lors de l'audit interne. Elle dessine la zone de compétence actuelle du laboratoire.

2. La Moyenne du Marché (Ligne Grise en pointillés) : Correspond à la moyenne arithmétique de l'ensemble du panel (N=9). Elle matérialise le « standard » attendu pour une infrastructure de recherche en Europe aujourd'hui.
3. L'Enveloppe des Leaders (Zone Bleue transparente) : Cette courbe ne représente pas un laboratoire unique, mais la combinaison des scores maximaux obtenus par les membres du Groupe A (Leaders) sur chaque axe. Elle matérialise la « Frontière Technologique » actuelle, c'est-à-dire le maximum théorique atteignable en 2025.

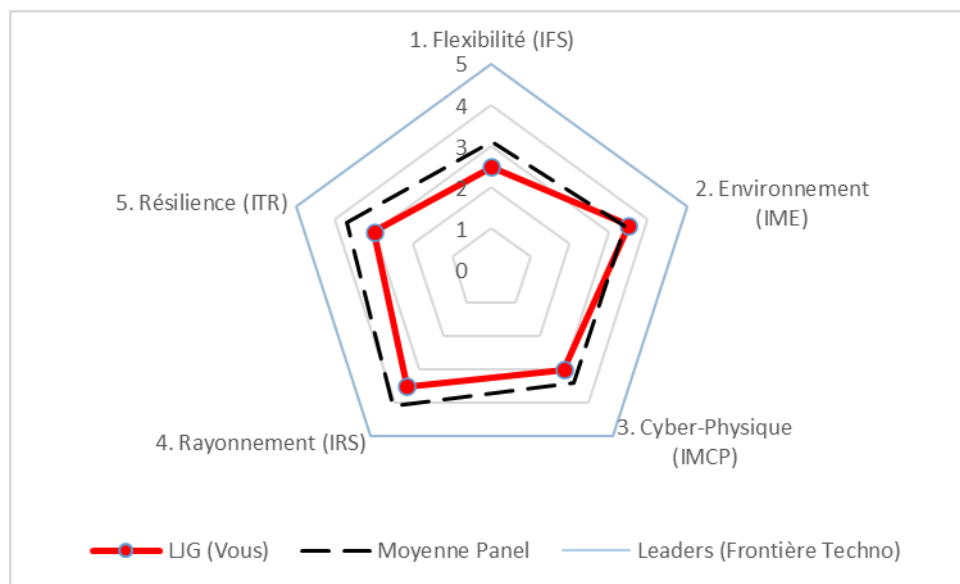


Figure 8 : Diagramme Radar comparatif (LJG vs Moyenne vs Leaders).

Plus la surface couverte est grande, plus la polyvalence de l'infrastructure est élevée. Les zones où la courbe rouge (LJG) dépasse la courbe grise (Moyenne) indiquent un avantage compétitif. Les zones où elle s'en éloigne vers le centre indiquent un retard technologique.

L'examen du profil radar révèle une divergence morphologique frappante entre le standard du marché et la réalité du Laboratoire Jacques Geelen. Contrairement à l'enveloppe des Leaders (Zone Bleue) qui tend vers un pentagone régulier, la courbe du LJG (Ligne Rouge) présente une asymétrie marquée.

Cette signature visuelle met en lumière deux dynamiques opposées qui régissent le fonctionnement actuel de l'infrastructure :

1. L'Ancre Structurel (L'aplatissement à gauche) Sur la partie gauche du graphique (Axes IFS et ITR), la courbe du LJG se rétracte vers le centre, s'éloignant

significativement de la frontière technologique. Cette contraction visuelle matérialise la contrainte physique du bâti existant. La rigidité de l'ossature bois et l'usure naturelle des composants (liée à l'âge du bâtiment) agissent comme une ancre qui tire la performance globale vers le bas. Le laboratoire ne peut physiquement pas rivaliser sur la flexibilité pure avec des structures modulaires comme KUBIK.

2. La Compensation Méthodologique (La pointe à droite) À l'inverse, sur la partie droite du graphique (Axes IME et IRS), la courbe du LJG s'étire vers l'extérieur, croisant et dépassant la ligne moyenne du marché (pointillés gris). Cette extension illustre une stratégie de « compensation par la méthode ». Ne pouvant changer les murs, le laboratoire a investi sur l'intelligence du test (Zone Tampon, protocoles Annexe 58). Cette excroissance graphique prouve que le LJG parvient à générer une valeur scientifique (IRS) supérieure à ce que sa simple infrastructure matérielle laisserait présager.

Le LJG n'est donc pas un laboratoire « moyen partout », mais un laboratoire « polarisé ». Il est techniquement contraint sur le Hard (le contenant), mais compétitif sur le Soft (le contenu et la méthode). Cette forme graphique est démonstrative des infrastructures matures qui ont su pivoter vers l'expertise intellectuelle pour compenser le vieillissement matériel.

L'espace graphique vacant entre la courbe du LJG et l'enveloppe des Leaders (Figure 9) ne représente pas seulement un différentiel de notation, mais une perte d'opportunité scientifique. Cette zone blanche matérialise la « dette technologique » que le laboratoire doit solder pour rester compétitif à l'horizon 2030.

L'analyse différentielle permet de hiérarchiser les écarts observés en deux catégories distinctes. La première concerne un écart critique lié au déficit d'interopérabilité, matérialisé par une différence de deux points sur l'axe de maturité cyber-physique. Si le laboratoire dispose bien des briques matérielles essentielles, telles que stockage et les panneaux photovoltaïques, il lui manque encore le liant numérique nécessaire pour les fédérer. Contrairement aux installations du groupe de tête qui opèrent comme des centrales virtuelles, le stockage fonctionne ici en îlot. L'action requise ne réside donc pas dans l'acquisition de matériel supplémentaire, mais dans le développement d'interfaces de communication capables de prendre le contrôle effectif des équipements existants.

La seconde catégorie relève de l'écart structurel, qui représente la divergence la plus importante avec un différentiel de 2,5 points sur l'axe de flexibilité. Toutefois, ce déficit est considéré comme accepté : transformer l'infrastructure en une structure totalement modulaire équivalente aux références du secteur exigerait une reconstruction complète, économiquement non viable. La stratégie consiste donc à ne pas tenter de combler cet écart par des travaux lourds, mais à le contourner par l'agilité numérique. Plutôt que de déplacer physiquement les parois, le laboratoire simulerait les variations d'inertie ou d'isolation grâce aux techniques d'hybridation matérielle.

En conclusion, ce diagnostic place le laboratoire à un point de bascule. Si la rigidité structurelle constitue une contrainte inhérente avec laquelle il faut composer, le retard cyber-physique représente une véritable barrière à l'entrée pour les recherches futures. La feuille de route devra par conséquent se concentrer exclusivement sur la résorption de ce déficit numérique et énergétique.

### 3. Synthèse stratégique SWOT

L'analyse comparative mène à un diagnostic global. Pour structurer les recommandations futures, il convient de croiser les caractéristiques intrinsèques du laboratoire avec les réalités du marché de la recherche énergétique.

#### *i. Matrice de synthèse*

Le tableau ci-dessous condense l'analyse des cinq dimensions précédentes sous la forme d'une matrice SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*). Elle permet de visualiser d'un coup d'œil l'équation stratégique que le LJJ doit résoudre.

INTERNE (Ce que le LJJ est)	FORCES (Strengths)	FAIBLESSES (Weaknesses)
<b>Analyse de l'Outil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crédibilité Scientifique : Validation internationale des protocoles via l'IEA</li> <li>• Maîtrise avancée du HIL et de la simulation hybride</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batterie présente mais fonctionnant en mode réflexe non pilotable pour la recherche</li> <li>• Absence totale de bornes de recharge (V2G/V2H)</li> <li>• Vieillessement des capteurs et de l'acquisition de données</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence d'une Zone Tampon offrant une polyvalence expérimentale rare</li> <li>• Coût d'exploitation modéré et flux continu de chercheurs (Doctorants/Master)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance de l'enveloppe en baisse due à l'âge naturel du bâti</li> </ul>
<b>EXTERNE (Ce que le marché souhaite)</b>	<b>OPPORTUNITÉS (<i>Opportunities</i>)</b>	<b>MENACES (<i>Threats</i>)</b>
<b>Analyse du Contexte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorité européenne donnée à la réhabilitation du parc existant (le profil exact du LJJ)</li> <li>• Demande croissante pour des tests de gestion collective (autoconsommation)</li> <li>• Position stratégique pour les projets Interreg et FEDER</li> <li>• La méthode virtuelle devient un standard accepté pour remplacer les tests physiques coûteux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Émergence des "Super-Labos" captant les gros financements industriels</li> <li>• Risque que les standards de mesure futurs exigent une précision que les vieux capteurs ne peuvent plus offrir</li> <li>• Le focus de la recherche glisse du "Bâtiment" vers le "Réseau". Sans mise à jour électrique, le LJJ risque la marginalisation</li> </ul>

Tableau 7 : Matrice SWOT du Laboratoire Jacques Geelen

## ii. Analyse des Facteurs Endogènes

L'axe vertical de la matrice, consacré au bilan de santé actuel de l'infrastructure, révèle une dichotomie marquée entre un contenu scientifiquement robuste et un contenant physiquement vieillissant. Du côté des forces, la valeur du laboratoire ne réside plus dans sa nouveauté architecturale, mais dans la maturité de son capital immatériel. La participation à l'Annexe 58 de l'Agence Internationale de l'Énergie constitue un actif stratégique majeur. Elle confère à l'infrastructure le statut de bâtiment calibré dont les propriétés thermiques sont connues avec une précision extrême par la communauté internationale, offrant un gage de fiabilité indispensable pour tout nouveau projet. Par ailleurs, la capacité à déployer des techniques d'hybridation matérielle transforme une contrainte physique en atout méthodologique : l'impossibilité de modifier la structure

est compensée par la simulation virtuelle, garantissant le maintien d'une pertinence scientifique élevée sans nécessiter d'interventions lourdes sur le gros œuvre.

Cependant, l'excellence méthodologique ne saurait masquer indéfiniment la pesanteur de la dette matérielle, où deux points de rupture se manifestent. Le premier, et le plus critique, concerne le déficit d'infrastructures pour les réseaux intelligents. En l'absence de capacités de stockage d'énergie ou d'interaction avec le réseau, le bâtiment devient inopérant pour la recherche de pointe sur la flexibilité, ce qui le décline mécaniquement face aux enjeux actuels. Le second point relève de l'entropie naturelle : la dégradation progressive de l'étanchéité à l'air et le vieillissement des capteurs installés au début des années 2000 font peser une menace sur la précision des mesures physiques brutes. En somme, le bilan interne dépeint le Laboratoire Jacques Geelen comme un expert agile logé dans un corps vieillissant. Si sa force de frappe scientifique demeure intacte, elle se trouve bridée par une infrastructure électrique obsolète. Le diagnostic n'appelle pas à une reconstruction du bâti, jugé suffisant, mais dicte l'impérieuse nécessité d'une mise à niveau des réseaux et des équipements de stockage.

### *iii. Analyse des Facteurs Exogènes*

L'exploration de l'axe horizontal de la matrice, confrontant les opportunités aux menaces, scrute l'environnement dans lequel évolue le laboratoire. Cette analyse révèle que la conjoncture politico-scientifique ouvre actuellement une fenêtre de tir historique, sous réserve d'éviter l'écueil de la marginalisation technologique. De manière paradoxale, l'ancienneté du bâtiment construit en 2003 se mue aujourd'hui en atout majeur dans le cadre du Pacte vert pour l'Europe. Alors que les priorités de financement communautaires délaissent la construction neuve au profit de la réhabilitation du parc existant, les imperfections thermiques d'une structure datée deviennent une richesse expérimentale. Scientifiquement, disposer d'un bâtiment témoin présentant des défauts réels s'avère bien plus pertinent pour éprouver des scénarios de rénovation profonde que l'usage d'une infrastructure neuve et irréprochable. Le LJG se positionne ainsi comme le candidat idéal pour simuler et valider la rénovation énergétique des bâtiments tertiaires du début du millénaire. Parallèlement, l'essor législatif en faveur de l'autoconsommation collective dessine une seconde perspective stratégique. Par son dimensionnement et sa localisation, le laboratoire possède le profil idoine pour opérer en tant que nœud expérimental dédié

aux micro-réseaux, lui permettant d'investir le champ des communautés d'énergie, un créneau porteur illustré par des projets récents comme LOCOMOTRICE.

Malgré ces opportunités, l'écosystème de la recherche devient impitoyable pour les structures intermédiaires, exposant le laboratoire à un risque tangible de décrochage technologique. Une véritable polarisation de la concurrence s'opère sous la forme d'une course à l'armement, où les financements massifs convergent vers des infrastructures géantes et ultra-connectées telles que l'Energy House 2.0. Face à ces géants, le maintien d'un positionnement généraliste condamnerait le LJJ à l'invisibilité, imposant dès lors une impérieuse nécessité de spécialisation.

Ce défi est accentué par un glissement sémantique majeur dans les priorités scientifiques : les appels à projets délaissent les thématiques traditionnelles de l'isolation, point fort historique de la structure, au profit de la flexibilité, du stockage et de l'interaction réseau. Si le laboratoire n'intègre pas ces nouveaux paradigmes dans son équipement matériel par l'ajout de batteries ou de bornes de recharge, il se verra mécaniquement exclu des futurs consortiums de recherche. En définitive, si le vent politique souffle dans la bonne direction en privilégiant la rénovation, le laboratoire a besoin de nouvelles voiles technologiques pour avancer. L'inertie constitue la seule menace mortelle : l'absence d'action immédiate condamnerait l'outil à l'obsolescence à l'horizon de cinq ans.

## 4. Conclusion

Au terme de cette analyse comparative, le positionnement du Laboratoire Jacques Geelen apparaît clairement défini. Avec un score de maturité de 3.1/5, il se situe à un point de bascule critique de son existence.

Le diagnostic révèle que le modèle du laboratoire passif, simple réceptacle de mesures physiques, est désormais obsolète. Si l'infrastructure a brillamment servi la recherche thermique des années 2000-2020 (isolation, vitrages), elle se heurte aujourd'hui à un plafond de verre technologique. L'absence de vecteurs de flexibilité électrique et le vieillissement de son système nerveux (capteurs) menacent de le déclasser face aux standards européens actuels.

Cependant, l'analyse SWOT démontre que ce déclassement n'est pas une fatalité. Le contexte européen, focalisé sur la rénovation massive du bâti existant, offre au LJJ une rente de situation unique. Contrairement aux laboratoires neufs et aseptisés, le

LJG possède la légitimité du réel : c'est un bâtiment existant, imparfait, qu'il faut optimiser.

« L'équation stratégique » est donc résolue : Le LJG ne doit pas chercher à imiter les géants du Groupe A, ce qui serait une erreur financière. Il devrait au contraire embrasser son identité de « Plateforme de Rénovation Intelligente ».

Pour réussir cette mutation, il ne suffit plus de maintenir l'outil en état de marche. Il faut procéder à un saut technologique ciblé. C'est l'objet du chapitre final, qui traduira ce diagnostic en une feuille de route opérationnelle d'investissements pour l'horizon 2025-2030.

## VIII. Discussion et recommandations stratégiques à l'horizon 2030

L'analyse de l'infrastructure actuelle révèle une situation singulière : le LJG n'est pas un simple bâtiment vieillissant, mais un écosystème complexe juxtaposant une structure existante (2003) et des équipements de pointe récents.

Ce chapitre vise à définir une stratégie pour transformer cette hétérogénéité matérielle en une cohérence scientifique. Il propose de faire évoluer la mission du LJG vers un modèle de « Smart & Hybrid Living Lab », capable de piloter simultanément le réel et le virtuel.

### 1. « Smart Retrofit Living Lab »

La valeur ajoutée du LJG réside désormais dans une dualité fonctionnelle qui transcende la distinction classique entre laboratoire d'essai et site de démonstration, l'infrastructure possédant les deux facettes. La synergie entre l'extension et le bâtiment principal engendre un cycle de validation unique : un équipement peut d'abord être caractérisé rigoureusement en chambre climatique sous des conditions météorologiques artificielles, avant d'être confronté aux aléas de l'exploitation réelle. Cette seconde phase, opérée physiquement ou virtuellement via l'hybridation, permet d'observer l'interaction du système avec des perturbations stochastiques concrètes telles que l'ouverture des fenêtres, la chaleur métabolique ou les puisages d'eau chaude.

Par ailleurs, l'intégration récente de capacités de production photovoltaïque couplées à une batterie de 12 kWh opère une mutation fondamentale de l'infrastructure, déplaçant le curseur de la simple sobriété vers la flexibilité temporelle. Le laboratoire se mue ainsi en micro-réseau expérimental ayant pour vocation de démontrer comment un bâtiment tertiaire standard peut devenir un acteur actif au sein d'une communauté d'énergie, capable de stocker le surplus solaire pour le restituer opportunément sous le pilotage d'algorithmes intelligents. En définitive, le LJG se redéfinit comme une plateforme d'intégration systémique dont l'objectif dépasse la simple mesure de performance parietale pour valider l'intelligence globale des systèmes énergétiques, à la croisée entre la précision métrologique du laboratoire et l'imprévisibilité de la vie réelle.

## 2. Plan d'Investissement Priorisé

Comme détaillé plus tôt, le LJG dispose d'une infrastructure de mesure et de contrôle mature, articulée autour de l'environnement LabWindows/National Instruments et Grafana. L'enjeu de la feuille de route n'est donc pas de reconstruire ce système, mais de le faire évoluer d'un rôle de supervision vers un rôle d'orchestration.

La stratégie repose sur l'exploitation avancée des actifs installés pour servir les nouveaux axes de recherche.

- **Convergence des Environnement** : Le laboratoire, déjà connecté aux outils de simulation, doit systématiser cette approche pour l'ensemble des nouveaux équipements. L'intégration complète des chambres climatiques de l'extension dans la boucle de régulation centrale permettra de ne plus les traiter comme une annexe indépendante, mais comme une "tuile" interchangeable du bâtiment global, idéale pour tester la résilience des algorithmes de contrôle face à des conditions extrêmes simulées.
- **Activation de la flexibilité électrique** : Bien que fonctionnels pour les besoins internes, le stockage électrique et le PV doivent être détournés de leur usage standard pour la recherche expérimentale. Il est crucial de développer des scénarios de pilotage contraignants qui outrepassent la logique d'autoconsommation, transformant ainsi ces équipements de production en outils de validation concrets pour les thématiques de Communautés d'Énergie.
- **Hybridation des Vecteurs** : La diversité des vecteurs du LJG doit être exploitée par la création de routines de contrôle unifiées. L'objectif est d'arbitrer en temps réel entre ces sources selon des signaux externes simulés (prix de l'énergie, carbone), démontrant la capacité du bâtiment à optimiser dynamiquement son mix énergétique, une compétence clé du Smart Retrofit.

## 3. Feuille de Route Opérationnelle 2025-2030

La mise en œuvre de cette stratégie d'orchestration ne nécessite pas de lourds travaux de génie civil, mais un développement méthodique des capacités de pilotage. Nous proposons un déploiement séquentiel sur cinq ans, progressant de la fiabilisation interne vers l'ouverture systémique.

- Phase 1 : Orientée vers la fiabilisation et la convergence à l'horizon 2025-2026, cette première phase poursuit l'objectif de maîtriser le dialogue inter-systèmes. L'effort se concentre prioritairement sur la couche logicielle d'interopérabilité afin de garantir que l'ensemble des actifs du laboratoire communiquent selon un protocole commun avant le lancement de campagnes expérimentales complexes. Concrètement, cette mise à niveau passe d'abord par le développement et la validation de routines de pilotage spécifiques pour la batterie de 12 kWh, opération qui nécessite de contourner la régulation standard de l'onduleur via l'environnement LabWindows ou Python. Parallèlement, la convergence métrologique exige l'intégration complète des flux de données issus des chambres climatiques de l'extension vers le superviseur central et les tableaux de bord Grafana, assurant ainsi une historisation unifiée de l'ensemble des mesures.
- Phase 2 : Programmée à l'horizon 2027-2028, cette seconde phase se concentrera sur la mise à l'épreuve de la flexibilité active. Une fois les protocoles de commande validés, le laboratoire entamera une période d'exploitation scientifique intensive axée sur le potentiel d'intelligence énergétique du bâtiment. Les campagnes expérimentales prévoient notamment des scénarios de délestage contraint durant lesquels l'infrastructure devra s'effacer du réseau électrique pendant plusieurs heures en basculant sur ses capacités de stockage électrique et thermique et en modulant ses pompes à chaleur, le tout sans compromettre le confort intérieur. Parallèlement, le déploiement de l'hybridation matérielle permettra de conduire les premiers essais couplés, où un équipement physique situé dans l'extension interagira en temps réel avec les sollicitations d'un bâtiment virtuel modélisé sous TRNSYS.
- Phase 3 : Enfin, à l'horizon 2029-2030, la troisième phase consacrera l'ouverture systémique de l'infrastructure vers le concept de communauté d'énergie, avec pour ambition de simuler les interactions à l'échelle du quartier. En dépassant ses murs physiques, le laboratoire a vocation à devenir un nœud de simulation central pour le campus d'Arlon. Cette évolution passera par l'interconnexion numérique du gestionnaire énergétique du LJG avec les profils de consommation des bâtiments voisins. Sur le plan opérationnel, cette configuration permettra de mener des simulations de marché axées sur

l'autoconsommation collective : en partageant virtuellement ses excédents photovoltaïques ou ses capacités de stockage avec son voisinage, le laboratoire préfigurera les modèles économiques et techniques des futures Communautés d'Énergie Renouvelable (CER).

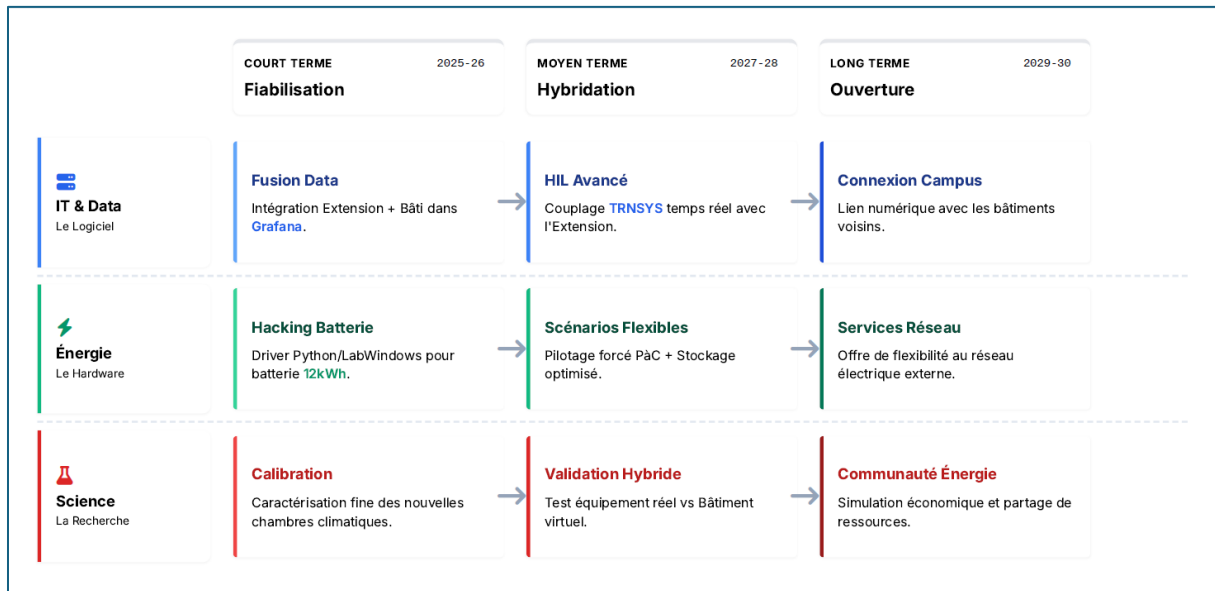


Figure 9 : Roadmap stratégique pour le LJJ à l'horizon 2025-2030

## 4. Limites et Risques

La stratégie de transformation du LJJ en « Smart & Hybrid Living Lab » repose sur une hypothèse forte : la capacité à faire converger des technologies disparates (un bâtiment de 2003 et des équipements d'après 2020). Cette approche par l'intégration logicielle, bien que moins coûteuse en investissement matériel (CAPEX), soulève des défis opérationnels qu'il convient d'identifier.

Le principal obstacle à cette transformation réside dans l'hétérogénéité générationnelle des composants. Le système nerveux historique du bâtiment, reposant sur une instrumentation dense centralisée via une interface LabWindows, doit désormais cohabiter avec les standards de communication modernes de la nouvelle batterie et de l'extension. Cette tentative d'unification des données au sein d'un "Data Lake" commun expose le projet à des risques d'incompatibilité protocolaire ou de désynchronisation temporelle entre l'ancien réseau filaire et les nouveaux équipements connectés. Pour mitiger ce risque, il sera important d'éviter un démantèlement brutal de l'existant au profit du développement progressif de passerelles logicielles assurant la continuité des mesures.

Par ailleurs, le déplacement de la valeur ajoutée du matériel vers le logiciel transforme la nature de la maintenance. Le laboratoire fonctionnant au rythme des rotations de doctorants, une architecture informatique trop complexe, fondée sur des scripts "maison" non documentés, risque de se muer en une "boîte noire" ingérable après le départ de ses concepteurs. Pour éviter que l'outil ne devienne une "usine à gaz" contraignant les futurs chercheurs à un retour au pilotage manuel, la phase de fiabilisation devra impérativement intégrer une documentation rigoureuse et la création d'interfaces graphiques simplifiées, garantissant l'accessibilité des scénarios complexes aux non-informaticiens.

Enfin, malgré l'apport de l'hybridation numérique, la réalité physique du bâti impose ses propres limites. La structure en ossature bois, bien que représentative du résidentiel basse consommation, manque de l'inertie thermique lourde caractéristique des grands bâtiments tertiaires en béton, rendant l'extrapolation directe des résultats de stockage passif délicate. C'est ici que la stratégie HIL prend tout son sens : la structure légère servira de cas d'école pour la réactivité rapide, tandis que l'inertie lourde sera simulée virtuellement via les modèles couplés TRNSYS.

En conclusion, la feuille de route proposée se veut ambitieuse mais réaliste. Elle n'exige pas la reconstruction du laboratoire, mais le « recâblage de son intelligence ». En acceptant ces risques et en les gérant par une approche progressive, le Laboratoire Jacques Geelen dispose de tous les atouts pour réussir son pivot vers les communautés d'énergie et la rénovation intelligente.

## IX. Conclusion

Le Laboratoire Jacques Geelen (LJG) atteint aujourd'hui, après deux décennies d'activité, un jalon critique de son cycle de vie. Conçu au début des années 2000 comme un outil pionnier pour l'étude de la thermique du bâtiment, il fait face en 2025 à un paysage de la recherche radicalement transformé par les impératifs de la transition énergétique et la digitalisation des réseaux.

Dans ce contexte, la question centrale qui a guidé ce travail de fin d'études était de déterminer *comment le laboratoire se positionne aujourd'hui par rapport aux principales infrastructures expérimentales dédiées aux mesures dynamiques en vraie grandeur, et quelles recommandations pouvaient être formulées afin de renforcer ses capacités expérimentales et sa compétitivité scientifique.*

Pour répondre à cette problématique, une méthodologie d'audit multidimensionnelle a été développée et appliquée. En décomposant la performance du laboratoire selon cinq axes ; Flexibilité, Environnement, Maturité, Rayonnement et Résilience, et en la confrontant à un panel de 8 infrastructures de référence, ce travail a permis de dresser un diagnostic objectif au possible et quantifié des forces en présence.

Les résultats de cette analyse révèlent un profil singulier. Le LJG ne se positionne pas comme un concurrent direct des structures leaders neufs et entièrement modulaires (type *Energy House 2.0*). Il présente une signature morphologique asymétrique : s'il est structurellement contraint par son ossature fixe et le vieillissement de son instrumentation d'origine, il bénéficie d'une crédibilité scientifique intacte et, surtout, d'une richesse matérielle insoupçonnée. L'inventaire technique a en effet mis en lumière la coexistence d'actifs hétérogènes mais puissants : un bâti existant représentatif, une extension climatique récente de haute précision, et des vecteurs de flexibilité modernes (batterie 12 kWh, production PV) encore sous-exploités.

Le diagnostic final est donc clair : le Laboratoire Jacques Geelen ne souffre pas forcément d'un déficit d'équipement, mais d'un déficit d'intégration. Ses organes sont performants, mais son système nerveux est fragmenté.

En réponse à ce constat, ce mémoire formule une stratégie de mutation vers le modèle de « Smart & Hybrid Living Lab ». Plutôt que de préconiser des investissements lourds dans le génie civil, la feuille de route 2025-2030 privilégierait l'intelligence logicielle et l'interopérabilité. L'enjeu est de faire dialoguer le « Neuf » (l'extension contrôlée) et l'«

Ancien » (le bâtiment perturbé) au sein d'un écosystème unifié. En déverrouillant le pilotage de la batterie et en hybridant les tests physiques avec la simulation numérique (HIL), le LJG pourra simuler des scénarios de flexibilité énergétique complexes, impossibles à réaliser dans une simple chambre climatique aseptisée.

Il convient enfin de souligner la part de subjectivité inhérente à tout exercice de benchmarking stratégique. Bien que ce travail ait visé la plus grande objectivité possible à travers la triangulation des sources et la formalisation de cette matrice à 5 indicateurs, il reste tributaire de l'hétérogénéité des données disponibles et des choix de pondération effectués. Ce diagnostic constitue donc une construction intellectuelle située : une approche méthodologique différente, ou une analyse menée par un autre observateur privilégiant d'autres indicateurs de performance, aurait pu éclairer des dynamiques distinctes et aboutir à une cartographie concurrentielle sensiblement voire totalement différente.

En conclusion, loin d'être un handicap, l'âge et la structure du Laboratoire Jacques Geelen deviennent aujourd'hui des atouts stratégiques. À l'heure où l'Europe lance sa « Vague de Rénovation » (*Renovation Wave*), la recherche a moins besoin de bâtiments neufs parfaits que de démonstrateurs capables de prouver qu'il est possible de rendre intelligent le parc existant. En réussissant sa transformation numérique, le LJG ne se contentera pas de survivre ; il deviendra la preuve vivante que la transition énergétique est autant une question d'optimisation système que de construction neuve.

## X. Bibliographie

*Advanced Computing Annual Report : Fiscal Year 2023 | NLR.* (s. d.). Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse <https://www.nrel.gov/computational-science/annual-report-2023>

*BRE Watford Innovation Park.* (s. d.). [Commentary; Project Knowledge; Research, Development and Innovation]. <https://www.designingbuildings.co.uk>. Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/BRE\\_Watford\\_Innovation\\_Park](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/BRE_Watford_Innovation_Park)

Building Envelope Testing. (s. d.). *Applied Technical Services.* Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse <https://atslab.com/engineering/commercial-properties/building-envelope-testing/>

Canada, N. R. C. (2019, mars 16). *The Twin Test Houses research facility.* <https://nrc.canada.ca/en/research-development/nrc-facilities/twin-test-houses-research-facility>

*EnergyVille expands Open Thor Living Lab with innovative thermal network and new research buildings | VITO.* (s. d.). Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse <https://vito.be/en/news/energyville-expands-open-thor-living-lab-innovative-thermal-network-and-new-research-buildings>

EnergyVille Foundation. (2024). *EnergyVille* (p. 17).

*Finances.* (s. d.). Fraunhofer-Gesellschaft. Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse <https://www.fraunhofer.de/en/about-fraunhofer/profile-structure/facts-and-figures/finances.html>

*FLEXLAB.* (s. d.). Energy.Gov. Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/flexlab>

Jack, R., Loveday, D., Allinson, D., & Lomas, K. (2018). First evidence for the reliability of building co-heating tests. *Building Research & Information*, 46(4), 383-401. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1299523>

Janssens, A. (s. d.-a). *Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements.*

Janssens, A. (s. d.-b). *Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of subtask 1a : Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances.*

Jin, Q., Sun, Q., & Meng, G. (2024). Outdoor testbeds for studies on performance of building envelopes : Review and recommendations. *Science and Technology for the Built Environment*, 30(8), 877-917. <https://doi.org/10.1080/23744731.2024.2378677>

Jules Verne climatic wind tunnel. (2024). In *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jules\\_Verne\\_climatic\\_wind\\_tunnel&oldid=1216353612](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jules_Verne_climatic_wind_tunnel&oldid=1216353612)

KU LEUVEN. (s. d.). *Workshop full scale test facilities for evaluation of energy and hygrothermal performances*.

*Laboratory—Uliege—Bems—ULiège*. (s. d.). Consulté 30 décembre 2025, à l'adresse [https://www.bems.uliege.be/cms/c\\_5733277/en/bems-laboratory](https://www.bems.uliege.be/cms/c_5733277/en/bems-laboratory)

*Le Centre scientifique et technique du bâtiment | Cour des comptes*. (2017, mars 22).  
<https://www.ccomptes.fr/fr/publications/le-centre-scientifique-et-technique-du-batiment>

Léthé, G. (2016). *Comparing several experimental (dynamic) co-heating protocols to identify the thermal performance of residential buildings* (p. 21).

Moortel, E. V. de, Allacker, K., Troyer, F. D., Schoofs, E., Stijnen, L., Moortel, E. V. de, Allacker, K., Troyer, F. D., Schoofs, E., & Stijnen, L. (2022). Dynamic Versus Static Life Cycle Assessment of Energy Renovation for Residential Buildings. *Sustainability*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/su14116838>

Moradi, S., Hirvonen, J., & Sormunen, P. (2024). A qualitative and life cycle-based study of the energy performance gap in building construction : Perspectives of Finnish project professionals and property maintenance experts. *Building Research & Information*, 52(5), 564-576. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2284986>

O'Leary, T., & Duffy, A. (2018). The Design, Construction and Commissioning of a Small Scale Dynamic Calibrated Hot Box (CHB). *Healthy, Intelligent and Resilient Buildings and Urban Environments*, 1473-1478.  
<https://doi.org/10.14305/ibpc.2018.ps32>

OSTI. (2016). *Annual Financial Report Lawrence Berkeley National Laboratory*. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Pandraud, G., & Isover, S.-G. (s. d.). Rapid Building Thermal Diagnosis : Presentation of the QUB Method. . . *Methodology*.

*PhD Thesis*. (s. d.). Consulté 5 janvier 2026, à l'adresse [https://www.uee.uliege.be/cms/c\\_10531941/fr/uee-phd-thesis](https://www.uee.uliege.be/cms/c_10531941/fr/uee-phd-thesis)

*Presentation*. (s. d.). Consulté 5 janvier 2026, à l'adresse [https://www.bems.uliege.be/cms/c\\_5926976/en/presentation](https://www.bems.uliege.be/cms/c_5926976/en/presentation)

*Reducing Building Energy Performance Gap : Integrating Agent-Based Modelling and Building Performance Simulation | MDPI*. (s. d.). Consulté 30 décembre 2025, à l'adresse <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/10/1728>

rubenvaes.be. (s. d.). *Home*. Campus Energyville. Consulté 5 janvier 2026, à l'adresse <https://campusenergyville.be/en/>

Saelens, D., & Reynders, G. (s. d.). *Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements*.

Schumacher, C. J., Ober, D. G., Straube, J. F., & Grin, A. P. (s. d.). *Development of a New Hot Box Apparatus to Measure Building Enclosure Thermal Performance*.

Sghiri, A., Gallab, M., Merzouk, S., Assoul, S., Sghiri, A., Gallab, M., Merzouk, S., & Assoul, S. (2025). Leveraging Digital Twins for Enhancing Building Energy Efficiency : A Literature Review of Applications, Technologies, and Challenges. *Buildings*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/buildings15030498>

Stamp, S., Altamirano-Medina, H., Lowe, R., Stamp, S., Altamirano-Medina, H., & Lowe, R. (2017). Assessing the Relationship between Measurement Length and Accuracy within Steady State Co-Heating Tests. *Buildings*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/buildings7040098>

*Static vs dynamic analysis*. (2017, octobre 12). Altair Community. <https://community.altair.com/discussion/10594/static-vs-dynamic-analysis>

Strachan, P., Svehla, K., Kersken, M., & Heusler, I. (s. d.). *Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements*.

*Systems Performance Laboratory | Buildings | NLR*. (s. d.). Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse <https://www.nrel.gov/buildings/systems-performance>

The Difference Between In Situ Testing and Lab Analysis. (s. d.). *AMS, Inc*. Consulté 31 décembre 2025, à l'adresse <https://www.ams-samplers.com/blog/the-difference-between-in-situ-testing-and-lab-analysis/>

*Twin houses*. (s. d.). Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. Consulté 1 décembre 2025, à l'adresse <https://www.ibp.fraunhofer.de/en/building-physics-testing/twin-houses.html>

van Dronkelaar, C., Dowson, M., Burman, E., Spataru, C., & Mumovic, D. (2016). A Review of the Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-Domestic Buildings. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1. <https://doi.org/10.3389/fmech.2015.00017>

Verbeke, S., & Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings : A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2300-2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>