

Nom du participant : Roland CUBIN

[email: rcubin@gmail.com](mailto:rcubin@gmail.com)

Date: 02 mars 2025



# Enjeux et perspectives de l'habitat autonome

**Mots-clés : Habitat autonome, autonomie énergétique, habitat léger, résilience énergétique, énergies renouvelables.**

## **Abstract :**

Face aux défis du changement climatique et à la hausse des coûts de l'énergie, l'habitat autonome suscite un intérêt croissant en tant qu'alternative aux réseaux centralisés. Ce modèle vise à assurer un approvisionnement en eau et en électricité indépendant, réduisant ainsi l'empreinte carbone et renforçant la résilience énergétique. Toutefois, son développement soulève des défis majeurs, notamment en matière de gestion de l'intermittence des ressources renouvelables, de stockage et de rentabilité économique à long terme.

Cette étude dresse un état de l'art des solutions technologiques, économiques et environnementales permettant d'assurer une autonomie complète en énergie et en eau. Conçu pour minimiser son impact environnemental, l'habitat autonome repose sur des principes démontables, impliquant fondations amovibles et absence de raccordement aux réseaux publics.

L'analyse porte sur les besoins d'une famille type de quatre personnes en Île-de-France et compare différentes configurations de production et de stockage d'eau et d'énergie, combinant panneaux photovoltaïques, batteries, chaudières biomasse et hydrogène. Elle évalue également les leviers d'optimisation liés à la gestion de l'intermittence des ressources et aux stratégies de stockage et de réemploi.

Les résultats montrent que le coût du kWh produit en autonomie est compétitif dans certains contextes. En termes d'empreinte carbone, l'habitat autonome en France est plus sobre en CO<sub>2</sub> que le mix énergétique de 88 % des pays, notamment aux États-Unis, en Chine et en Inde. Cependant, son intérêt économique reste limité à 16 % des pays, et seuls 14 % combinent un avantage à la fois avantage économique et environnemental.

L'étude met en perspective deux axes majeurs :

- La réduction de la consommation énergétique par une conception bioclimatique rigoureuse et une gestion optimisée des usages.
- La limitation de l'artificialisation des sols, en favorisant l'exploitation d'espaces non aménagés sans infrastructures lourdes, dans une logique d'habitat plus flexible et autonome.

Ces résultats confirment que l'habitat autonome est désormais une alternative crédible, mais dont la mise en œuvre demeure complexe pour l'habitant. Son adoption à grande échelle nécessitera une mobilisation des acteurs de l'immobilier et de la construction, en lien avec les fournisseurs d'énergie, afin de structurer un écosystème adapté à ce modèle émergent.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	5
1. BESOINS EN EAU ET EN ENERGIES EN HABITAT AUTONOME .....	6
1.1. Besoins conventionnels vs besoins raisonnés .....	6
1.2. Eau .....	6
1.3. Eaux usées .....	9
1.4. Fondations amovibles.....	10
1.5. Energies .....	11
1.6. Analyse des Coûts et Pertinence de l'Hydrogène pour un Habitat Autonome.....	17
2. Comparaison entre habitat autonome et habitat connecté aux réseaux sur 40 Ans .....	19
2.1. Comparaison des coûts entre autonomie et raccordement au réseau en France .....	19
2.2. Comparaison de l'intensité carbone entre un habitat autonome et une maison raccordée au réseau en France .....	22
2.3. Conclusion du comparatif économique et environnemental entre un habitat autonome et une maison raccordée au réseau dans le monde.....	25
2.4. Externalités positives.....	27
CONCLUSION - LIMITES ET PERSPECTIVES.....	29
ANNEXE 1 – Figures.....	30
Explication du tableau - Figure 1 : Besoin énergétique.....	30
Explication du tableau - Figure 2 : Répartition des besoins en énergie.....	31
Explication du tableau - Figure 3 : Production énergétique nécessaire.....	31
Explication du tableau - Figure 4 : Surproductions .....	32
Explication du tableau - Figure 5 : Gestion des surproductions et robustesse .....	32
Explication du tableau - Figure 6 : Coût carbone de fabrication des équipements énergétiques .....	33
Explication du tableau - Figure 7 : Coût économique de fabrication des équipements énergétiques.....	34
Explication du tableau - Figure 8 : Coût carbone de construction des équipements .....	35
Explication du tableau - Figure 9 - Comparaison internationale du coût et de l'empreinte carbone du kWh .....	37
SOURCES.....	44

## INTRODUCTION

La construction représente 30 % des émissions de gaz à effet de serre et constitue un des principaux leviers d'action pour limiter l'impact environnemental des activités humaines. L'urbanisation continue son expansion sans limite, artificialisant les sols et mobilisant des infrastructures énergivores, sans qu'aucune innovation de rupture ne permette encore d'atteindre un modèle urbain réellement neutre en carbone. Dans ce contexte, il est légitime d'examiner la faisabilité d'un habitat léger et autonome, conçu pour fonctionner indépendamment des réseaux centralisés, sans compromettre le confort moderne.

Ce rapport a pour objectif d'évaluer de manière factuelle et scientifique la viabilité de ce type d'habitat en confrontant les impacts environnementaux et économiques de deux approches :

- L'urbanisme conventionnel, basé sur des infrastructures fixes, des réseaux centralisés et une forte dépendance énergétique.
- L'habitat autonome, fonctionnant sans raccordement, sans artificialisation des sols, et utilisant exclusivement les énergies renouvelables.

L'étude s'appuie sur l'état de l'art des technologies existantes et des données disponibles pour établir un comparatif objectif entre ces deux modèles. L'analyse porte notamment sur la production et la gestion des énergies et des fluides, la capacité d'un habitat autonome à garantir un usage sans contrainte particulière, ainsi que la compatibilité avec la réglementation en vigueur, qui impose aux habitats légers d'être amovibles et de préserver le caractère naturel du site d'implantation.

## 1. BESOINS EN EAU ET EN ENERGIES EN HABITAT AUTONOME

Afin d'atteindre l'autonomie énergétique, un habitat autonome doit revêtir des caractéristiques particulières. La plus grande isolation doit être recherchée afin de limiter les besoins en chauffage, la ventilation doit être pensée pour le rafraîchissement en été, les énergies renouvelables doivent trouver leur emplacement en s'intégrant à l'habitat. De même, l'emplacement, l'exposition ainsi que le recyclage méritent une attention particulière. Pour l'étude comparative, l'étude portera sur une maison de 100 m<sup>2</sup> et 4 personnes pour caractériser l'ensemble des besoins.

### 1.1. Besoins conventionnels vs besoins raisonnés

Sur le site Internet d'Engie on peut lire : « *pour un logement de 75 m<sup>2</sup> (soit environ 3 à 4 occupants), dont la consommation est comprise entre 10 000 et 14 000 kWh, la facture s'élèvera à 2 000 et 2 500 euros environ* ». Dans le cadre de ce rapport, nous prendrons en compte le fait que ces occupants sont prêts à intégrer dans leur quotidien, et ce sans déroger à leur confort, un certain nombre d'actions et de bonnes pratiques visant à converger vers une autonomie la plus complète possible. Il s'agit de déterminer les besoins en ressources (eau, énergie, etc.) en prenant en compte des comportements responsables et durables.

### 1.2. Eau

#### (a) Gestion des besoins en eau dans un habitat durable

Les besoins initiaux en eau pour une famille de quatre personnes sont estimés à 150 m<sup>3</sup> par an, soit environ 100 litres par jour et par personne. Cette consommation, bien qu'encore fréquente dans de nombreux foyers, peut être significativement réduite grâce à une combinaison d'innovations technologiques et de pratiques responsables<sup>1</sup> :

- **Douche cyclique** : Les systèmes de douche à recyclage, tels que la douche cyclique, permettent de réduire jusqu'à 70 % la consommation d'eau. En adoptant une estimation prudente d'une économie de 50 %, la consommation annuelle liée aux douches peut être réduite de 25 m<sup>3</sup>.
- **Appareils électroménagers économes en eau** : Les lave-linge et lave-vaisselle modernes, comme les modèles intégrant des technologies de réduction d'eau, diminuent la consommation d'environ 27 % par cycle, ce qui représente un gain annuel estimé à 4 m<sup>3</sup> pour une famille moyenne.
- **Comportements responsables** : Une réduction de la consommation d'eau pour l'hygiène personnelle peut être obtenue en passant de 60 litres/jour/personne à 45 litres/jour/personne, grâce à des pratiques comme la limitation de la durée des douches ou l'optimisation des équipements, engendrant ainsi une économie supplémentaire de 20 m<sup>3</sup> par an.

- **Systèmes de recyclage des eaux grises** : Les technologies permettant de réutiliser les eaux grises pour les sanitaires offrent une réduction moyenne de 66 % de la consommation d'eau dédiée à cet usage, soit une économie d'environ 20 m<sup>3</sup>/an.

#### **(b) Vision d'un habitat résilient et économe**

Dans un contexte standard, une consommation de base de 100 litres par jour et par personne est réaliste. Avec une gestion rigoureuse des ressources et un déploiement des technologies de recyclage et de réduction, il est envisageable de réduire la consommation d'eau à 50 m<sup>3</sup> par an pour une famille de quatre personnes. Cela représente environ **34 litres par jour et par personne**.

Cependant, même en adoptant des équipements économes en eau et des pratiques durables, une valeur cible de **45 l/jour/personne** soit **65 m<sup>3</sup>/an** apparaît comme un compromis équilibré.

#### **(c) Analyse de la récupération d'eau dans un habitat autonome**

La récupération d'eau, en complément des solutions de recyclage, constitue une approche clé pour réduire la dépendance aux ressources hydriques externes. Deux méthodes principales peuvent être envisagées: la récupération des eaux de pluie et le forage. Dans le cadre d'un habitat léger et démontable, seule la récupération des eaux de pluie est étudiée.

#### **(d) Récupération des eaux de pluie**

La récupération des eaux de pluie à partir des toitures est étudiée pour Paris avec une pluviométrie annuelle de **583,7 mm**.

#### **Définition des variables :**

- S: Surface de collecte de toiture en m<sup>2</sup>
- P: Précipitations annuelles en mm
- E: Efficacité de collecte 80 %.
- C: Consommation d'eau annuelle par personne en m<sup>3</sup>.
- N: Nombre de personnes dans la famille (ici 4).
- C<sub>j</sub>C: Consommation journalière par personne en L/jour

#### **Formule de collecte d'eau de pluie :**

$$V_{pluie} = S \times P \times E$$

#### **Formule de consommation d'eau :**

$$V_{consommation} = C_j \times N \times 365 / 1000$$

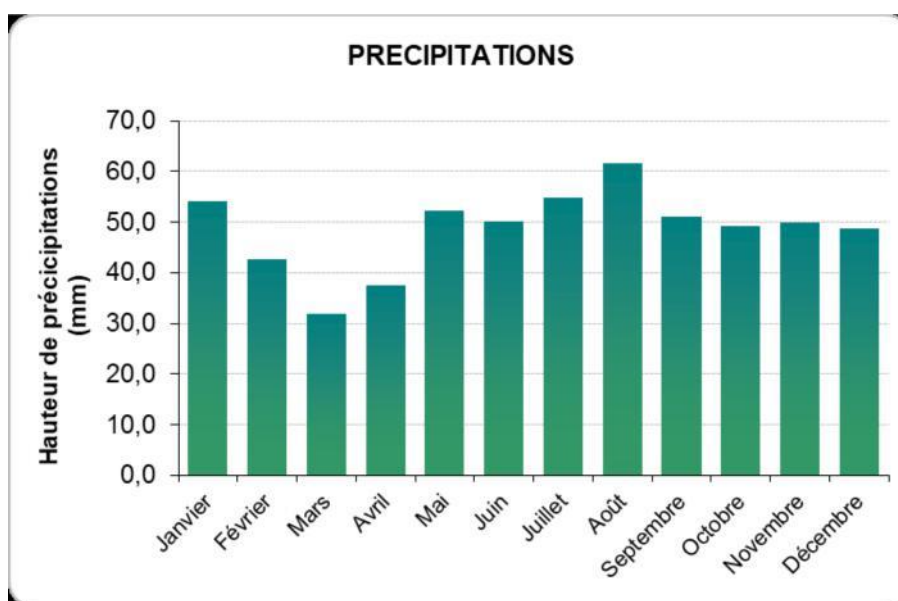
Pour couvrir intégralement les besoins, la surface de collecte correspond à :

$$S = V_{\text{consommation}} / P \times E$$

$$V_{\text{consommation}} = 45 \times 4 \times 365 / 1000 = 65.7 \text{ m}^3$$

$$S = 65,7 / 0,47 \approx 140,6 \text{ m}^2$$

Pour couvrir intégralement les besoins annuels en eau d'une famille de quatre personnes consommant **45 l/jour/personne**, une surface de collecte d'environ **141 m<sup>2</sup>** serait nécessaire, dans les conditions climatiques Parisienne et suivant l'efficacité de collecte de 80%.



Précipitation moyenne en Ile-de-France 2022 EGIS

#### (e) Besoin en stockage – période de sécheresse

La gestion durable de l'eau en habitat autonome repose sur l'équilibre entre récupération et consommation<sup>3</sup>. À Paris, avec une surface de collecte de 141 m<sup>2</sup>, il est possible de récupérer 5,30 m<sup>3</sup> d'eau en juillet, couvrant 95 % des besoins d'une famille de quatre personnes (5,58 m<sup>3</sup>/mois). Face aux sécheresses prolongées<sup>2</sup>, une cuve de 10 à 15 m<sup>3</sup> est recommandée pour sécuriser l'approvisionnement sur au moins 45 jours.

#### (f) Impact de la réglementation sur les eaux impropres à la consommation

La réglementation française encadre strictement l'usage des eaux impropres à la consommation humaine (EICH) en milieu domestique afin de garantir la sécurité sanitaire tout en favorisant une gestion durable des ressources alternatives.

Les EICH sont autorisées pour l'arrosage, le nettoyage des surfaces et véhicules, l'alimentation des chasses d'eau et certains usages industriels ou agricoles. Toute utilisation pour l'alimentation, l'hygiène personnelle ou la cuisine est interdite, sauf en l'absence de réseau public.

En France, la déconnexion totale du réseau public est interdite pour tout bâtiment situé dans une zone desservie. Cette obligation, définie par le Code de la Santé Publique (articles R1321-1 à R1321-63), vise à garantir la conformité sanitaire, la continuité de l'approvisionnement et à éviter toute contamination croisée entre réseaux. Les arrêtés du 21 août 2008 (eaux de pluie) et du 12 juillet 2024 (eaux grises) renforcent ces règles en imposant des normes strictes de séparation et de signalisation des réseaux. Toutefois, **certaines dérogations existent pour les zones non desservies ou des projets spécifiques sous conditions strictes**, incluant traitement de l'eau, entretien des installations et surveillance régulière.

### (g) Traitement de la potabilité de l'eau

L'eau potable doit respecter des normes sanitaires strictes définies par l'OMS<sup>4</sup> et transposées en droit français via le Code de la Santé Publique. Elle doit être exempte de micro-organismes pathogènes, contenir des substances chimiques en quantités contrôlées et présenter un goût, une odeur et une couleur neutres.

L'eau brute (pluie, nappe souterraine) doit subir plusieurs traitements pour garantir sa potabilité : filtration primaire (élimination des particules), traitement biologique (réduction des matières organiques), désinfection chimique ou UV (destruction des agents pathogènes) et filtration avancée (osmose inverse, charbon actif).

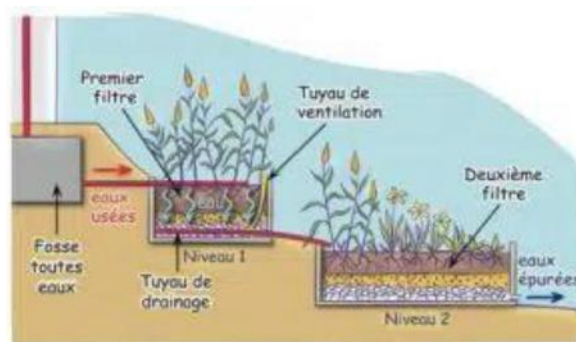
Les solutions adaptées aux habitats autonomes incluent les filtres à sédiments, les lampes UV, l'osmose inverse et le charbon actif, permettant un traitement efficace pour répondre aux normes de potabilité.

### (h) Conclusion sur l'autonomie en eau

En conclusion, l'autonomie en eau de l'habitat en Ile-de-France est réaliste et nécessite des surfaces de récupération suffisante pour assurer la collecte (**environ 140 m<sup>2</sup> pour une famille de 4 personnes**), implique la mise en œuvre de technologie de recyclage et une consommation raisonnée, impose de prendre des dispositions de stockage anticipant le réchauffement climatique et reste soumis à des demandes de dérogation liée à la localisation de l'habitat ainsi qu'à l'installation d'un équipement de filtration.

#### 1.3. Eaux usées

La phyto-épuration est une solution écologique permettant le traitement autonome des eaux usées domestiques, réduisant leur pollution de 90 à 95 % et garantissant un rejet conforme aux normes environnementales. La surface requise varie entre 5 et 10 m<sup>2</sup> par habitant, soit environ 40 m<sup>2</sup> pour un foyer de quatre personnes, assurant une filtration efficace grâce aux plantes utilisées. Le coût d'installation est estimé



entre 8 000 et 10 000 euros, incluant la conception et la mise en œuvre du système, tandis que l'entretien annuel, consistant au nettoyage des bassins et à la coupe des plantes, représente un budget de 100 à 300 euros. Avec une durée de vie de 20 à 30 ans, ce système se distingue par sa durabilité et son faible besoin en maintenance par rapport aux solutions conventionnelles. L'utilisation de papier toilette dans un système de phytoépuration est possible, mais elle implique de choisir un papier biodégradable à décomposition rapide et de surveiller régulièrement l'état du filtre pour éviter tout colmatage. De même, l'entretien du système nécessite l'usage de produits ménagers écologiques, car les désinfectants chimiques comme l'eau de Javel peuvent perturber les micro-organismes responsables du traitement des eaux usées, rendant un suivi rigoureux indispensable tel que renseigné sur le site [terrevivante.org](http://terrevivante.org).

#### 1.4. Fondations amovibles

Les pieux vissés en acier galvanisé assurent une fondation réversible et stable, permettant une installation rapide sans excavation lourde. Cette technique limite l'impact environnemental et préserve la porosité des sols. Bien que leur capacité de charge soit inférieure aux fondations classiques (5 à 15 tonnes), elle reste adaptée aux maisons individuelles. Leur durabilité est renforcée par la galvanisation et une épaisseur sacrificielle anticipant la corrosion.

En fin de vie, ces pieux peuvent être entièrement retirés, garantissant **une solution non-artificialisante**. Comparés aux pieux en bois, plus sensibles à l'humidité et aux insectes, ils offrent une meilleure longévité et un retrait simplifié.



## 1.5. Energies

### (a) Évaluation des besoins énergétiques pour un habitat autonome

Cet état de l'art se porte sur un habitat de 100 m<sup>2</sup> en Île-de-France pour une famille de quatre personnes, en analysant trois postes de consommation :

- Le chauffage, fortement réduit grâce aux standards Passivhaus<sup>5</sup>, avec une consommation estimée à **1 500 kWh/an** grâce à une isolation renforcée ( $R > 7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), du triple vitrage, une ventilation double flux et une conception bioclimatique optimisée.
- L'eau chaude sanitaire (ECS), représentant **1 600 kWh/an**, pouvant être couverte par un chauffe-eau solaire thermique ou un ballon thermodynamique couplé au photovoltaïque.
- L'électricité spécifique : consommation totale d'environ 2 650 kWh/an, répartie entre les équipements électroménagers (2 000 kWh), la cuisson (400 kWh) et l'éclairage LED (250 kWh).

Ces estimations permettent d'adapter la production énergétique pour assurer une autonomie optimisée.

La **consommation électrique totale** de l'habitat est estimée à **2 650 kWh/an**, selon les équipements et les usages.

Figure 1 - Besoin énergétique

Poste énergétique	Consommation annuelle estimée (kWh)	Catégorie d'Énergie
Chauffage	1 500 kWh/an	Chaleur
Eau chaude sanitaire	1 600 kWh/an	Eau chaude
Équipements électriques	2 650 kWh/an	Électricité
<b>Total besoin en énergie</b>	<b>5750 kwh/an</b>	<b>Tt énergies</b>

Détermination des besoins par mois :

Figure 2 - Répartition des besoins en énergie

Kwh/an	Besoin Annuel	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Répartition annuelle du besoin en chauffage		19%	16%	14%	7%	3%	2%	1%	1%	2%	5%	10%	20%
Chauffage	1500	285	240	210	105	45	30	15	15	30	75	150	300
Eau chaude sanitaire	1600	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133
Équipements électriques	2650	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
	<b>5750</b>	<b>638</b>	<b>593</b>	<b>563</b>	<b>458</b>	<b>398</b>	<b>383</b>	<b>368</b>	<b>368</b>	<b>383</b>	<b>428</b>	<b>503</b>	<b>653</b>

Au total, les besoins annuels en énergie d'un **habitat Passivhaus en Île-de-France** sont évalués à **5 750 kWh/an**.

### **(a) Limites de l'éolien et de l'hydraulique pour un habitat autonome**

L'installation d'une éolienne domestique pour un habitat autonome<sup>6</sup> présente plusieurs limitations en raison de son impact environnemental, de son coût, de sa production intermittente et des contraintes réglementaires.

Les nuisances sonores et visuelles, ainsi que l'exigence d'un espace dégagé, limitent son implantation en zone résidentielle ou boisée. Son coût élevé (10 000 à 30 000 € pour 5 kW) et son entretien contraignant la rendent moins compétitive que le solaire.

Sa dépendance au vent est un frein majeur : en Île-de-France, la vitesse moyenne (< 4 m/s) est insuffisante pour un bon rendement, alors que la plupart des modèles nécessitent 5 à 6 m/s. Même en conditions optimales, la production reste aléatoire, ce qui empêche l'éolien de devenir une source principale d'énergie.

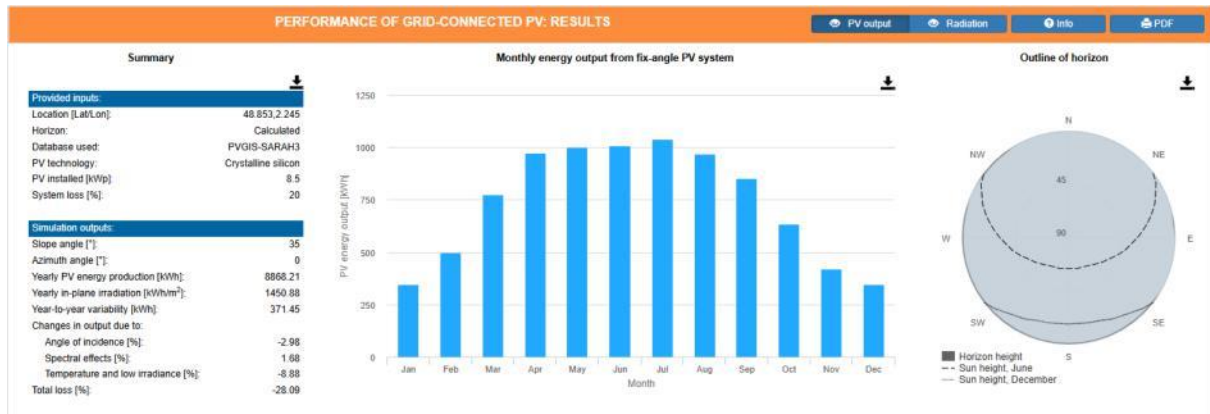
Certaines zones protégées interdisent leur implantation, compliquant leur adoption en milieu habité. Compte tenu de ces contraintes, l'éolien domestique n'est pas une solution viable pour un habitat totalement autonome en Ile-de-France au sens de la réglementation.

### **(b) Géothermie et Hydraulique**

Bien que les solutions de géothermie et d'hydraulique possèdent des avantages considérables, ces solutions ne sont pas étudiées car elles ne sont pas compatibles avec le caractère amovible de l'habitat autonome.

### **(c) Production d'énergie par panneaux solaires photovoltaïques**

L'énergie solaire constitue la principale source de production pour un habitat autonome. En utilisant l'outil de simulation de la commission européenne<sup>10</sup>, on peut déterminer que l'installation en toiture sud de 30 m<sup>2</sup> de panneaux solaires (8,5 Kwp) produit environ 8 800 kWh/an en Ile-de-France. Cette production varie selon les saisons et dépend des performances des modules photovoltaïques. Des recherches récentes ont mis en avant l'amélioration du rendement grâce à l'intégration de cellules photovoltaïques à haut rendement (>22 %) et de panneaux bifaciaux<sup>7</sup>.



*Une perte de 20% est prise en compte pour la transformation en courant alternatif pour la suite des calculs.*

Une étude menée sur des systèmes photovoltaïques autonomes a montré que l’ajustement dynamique de l’inclinaison des panneaux permettrait d’améliorer la production de 10 à 15 %, renforçant ainsi leur capacité à assurer une autonomie complète pour un foyer<sup>8</sup>.

En été, l’excédent énergétique peut être stocké dans des batteries ou converti en hydrogène. Cette approche est soutenue par des études récentes qui confirment l’intérêt de l’électrolyse pour transformer le surplus solaire en hydrogène utilisable en hiver, optimisant ainsi l’autonomie énergétique d’un habitat

9.

Grâce à la réduction des coûts des panneaux solaires et à l’amélioration de leur durée de vie (supérieure à 25 ans), cette solution s’impose comme rentable et fiable.

#### (d) Chaudière biomasse

La chaudière biomasse utilise des combustibles organiques renouvelables tels que les granulés, bûches ou plaquettes forestières pour produire de la chaleur et de l’eau chaude sanitaire. Son fonctionnement repose sur la combustion d’un fluide caloporteur, généralement de l’eau, permettant d’alimenter un système de chauffage central.

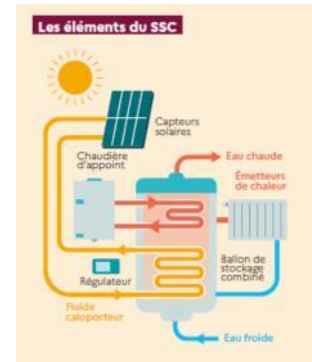
Le rendement des modèles modernes varie entre 80 et 95 %, avec une meilleure efficacité pour les chaudières à granulés. Les chaudières récentes intègrent des filtres à particules fines pour limiter les émissions et respecter les normes environnementales.

Le coût d’exploitation est inférieur à celui des énergies fossiles et moins sensible aux variations du marché. Cependant, cette solution nécessite un espace de stockage et un entretien régulier, incluant le nettoyage et le ramonage du conduit de fumée.

Dans le cadre d'une autonomie énergétique, la chaudière biomasse peut être couplée à un système solaire thermique pour couvrir les besoins en eau chaude en été.

### (e) Panneaux solaires thermiques

Les panneaux solaires absorbent l'énergie solaire afin de chauffer un réseau de fluide caloporteur<sup>11</sup>, ces derniers peuvent produire de l'eau chaude sanitaire et être utilisés comme solution de chauffage également mais les rendements sont très fluctuants sur une année et manque de puissance pour être la seule source de chauffage en hiver. Ils sont souvent confondus avec les panneaux photovoltaïques.



Les rendements sont de l'ordre de 35% et la puissance installée d'environ 3,5 Kw/m<sup>2</sup>/jour. Soit de l'ordre de 1750 kWh/an pour 5m<sup>2</sup> avec une variation mensuelle plus marquée que celle des panneaux photovoltaïques. Les surproductions nécessitent un traitement par dissipation pour éviter d'endommager les équipements.

### (f) Energies renouvelables et variation

Les énergies renouvelables sont par nature intermittentes et variables. Ainsi, un écart type de production de l'ordre de 25% est à prendre en compte et l'absence d'énergie lié au manque d'ensoleillement, tout comme la période de sécheresse, nécessite d'adapter le stockage à la plus longue période sans énergie disponible.

Il en résulte que les capacités de productions à mettre en œuvre sont dimensionnées pour répondre aux besoins maximaux pendant les périodes de tensions et sont supérieures aux besoins pendant les périodes de pleine production.

Puissances de productions à installer pour couvrir les besoins :

Figure 3 - Production énergétique nécessaire - en rouge les besoins en eau chaude insatisfaits par les panneaux solaires - en vert les compléments d'eau chaude pris en charge par la chaudière biomasse

Kwh/an	Production annuelle	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Photovoltaïque SUD	7085,6	276,8	400	618,4	779,2	800	800	831,2	773,6	683,2	508	336,8	278,4
Répartition mensuelle de la production des panneaux solaires		4%	6%	7%	10%	13%	14%	14%	13%	9%	5%	3%	2%
Panneaux solaires	1750	70	105	123	175	228	245	245	228	158	88	53	35
Chaudière biomasse	1770	348	268	210	105	45	30	15	15	30	75	231	398
	10605	695	773	951	1059	1073	1075	1091	1016	871	671	620	711

Surproductions :

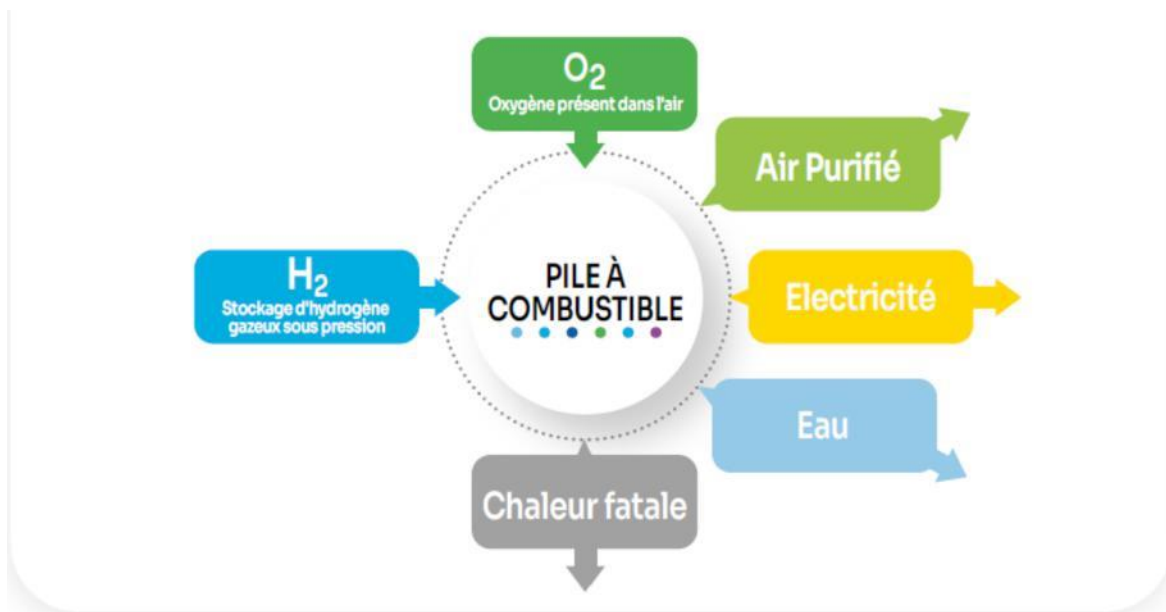
Figure 4 - Surproductions

Kwh/an	Surproduction	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Eau chaude	469			-11	42	95	112	112	95	25			
Electricité	4446	57	180	398	559	580	580	611	554	463	288	117	58
	4915	57	180	388	601	675	692	723	648	488	288	117	58

On observe que la puissance installée est d'environ le double des besoins identifiés et que la surproduction d'électricité est importante. Les surproductions d'eau chaude ne sont pas stockables et nécessitent d'être dissipées.

### (g) Comparaison des configurations d'autonomie énergétique et calcul du stockage d'hydrogène

La pile à hydrogène, ou pile à combustible<sup>15</sup>, est un dispositif électrochimique permettant de convertir directement l'hydrogène en électricité et chaleur, avec pour seul rejet de l'eau. Son fonctionnement repose sur une réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'oxygène (O<sub>2</sub>) de l'air au sein d'une membrane échangeuse de protons (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell).



Extrait schéma France Hydrogène

Dans un système résidentiel de stockage à hydrogène, l'électricité excédentaire issue de sources renouvelables peut être utilisée pour réaliser l'électrolyse de l'eau, générant de l'hydrogène gazeux. Cet hydrogène est ensuite comprimé et stocké dans des réservoirs haute pression (200 à 700 bars) situés à l'extérieur de l'habitation, garantissant une densité énergétique optimisée.

Le système développé par H2Gremm et Trecobat<sup>13</sup> illustre cette approche : une batterie résidentielle à hydrogène équipée d'un stockage en bouteille, permettant de sécuriser l'approvisionnement en électricité d'un foyer.

L'estimation du surplus de **4 400 kWh d'électricité** en été repose sur la différence entre la production solaire et la consommation effective des équipements domestiques.

Selon France Hydrogène, « le rendement de conversion de l'énergie électrique en hydrogène par électrolyse est d'environ 70 % », « la compression de l'hydrogène entraîne des pertes énergétiques estimées entre 10 % et 15 % » et « lors de la restitution, le rendement électrique des piles à combustible dépasse les 50 % », ce qui signifie que plus de la moitié de l'énergie est convertie en électricité, le reste étant dissipé sous forme de chaleur.

Ce différentiel permet de « stocker l'excédent sous forme d'hydrogène et d'optimiser la conversion énergétique », garantissant ainsi une autonomie hivernale robuste. Ce système permet d'envisager la réutilisation de 1323 kWh par an en électricité et 1323 kWh en chauffage (**total de 2646 kWh**) soit 50% des besoins en électricité et 43% des besoins en eau chaude sanitaire et chauffage.

Figure 5 - Gestion des surproductions et robustesse

Kwh/an	Rendement	57	180	398	559	580	580	611	554	463	288	117	58
Conversion hydrogène	0,6	34	108	239	336	348	348	367	332	278	173	70	35
Compression	0,85	29	92	203	285	296	296	312	282	236	147	60	30
Electricité	0,5	14	46	102	143	148	148	156	141	118	73	30	15
Chaleur	0,5	14	46	102	143	148	148	156	141	118	73	30	15

Cette solution réduit l'intérêt d'une chaudière biomasse et un simple poêle à buches serait largement suffisant en alternative, permettant également de baisser les coûts globaux.

Une alternative plus simple et moins coûteuse reste l'utilisation d'un groupe électrogène alimenté par des combustibles fossiles. En considérant une consommation de 0,25 L de diesel par kWh produit, il faudrait environ 1 000 L de diesel pour couvrir le déficit hivernal. Bien que cette solution soit techniquement plus accessible et économique, elle implique un rejet de 2,67 kg de CO2 par litre de diesel, soit un total d'environ 2,67 tonnes de CO2/an contre zéro émission directe pour l'hydrogène vert. C'est la solution la plus utilisée à cette heure dans les expérimentations disponibles sur internet mais elle n'est pas retenue comme solution environnementale satisfaisante pour le présent rapport.

## (h) Analyse fonctionnelle et gestion intelligente de l'énergie

La gestion énergétique repose sur une régulation automatisée en cascade. L'électricité solaire est consommée en priorité avant de recourir à l'hydrogène stocké. En hiver, l'hydrogène limite la demande en électricité, complété éventuellement par un poêle à bois pour le chauffage. La production d'eau chaude suit la même logique : solaire thermique en priorité, photovoltaïque ensuite, puis hydrogène en dernier recours.

Ce modèle, inspiré des systèmes de gestion énergétique des bâtiments de nouvelle génération, optimise<sup>22</sup> le mix énergétique à l'échelle résidentielle, bien que l'utilisation du poêle à bois reste manuelle.

### 1.6. Analyse des Coûts et Pertinence de l'Hydrogène pour un Habitat Autonome

Deux configurations sont comparées :

- **Type 1** : Panneaux photovoltaïques, batteries et **chaudière biomasse**. Cette solution permet d'assurer une autonomie énergétique à moindre coût, en absorbant les fluctuations de production solaire et en garantissant un apport hivernal grâce au bois. Toutefois, elle impose une gestion rigoureuse et économe de l'électricité en hiver et un entretien régulier.

Équipement	Prix	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	Coût total sur 40 ans
Panneaux solaires 5m <sup>2</sup>		20	1 600	64 000	
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)		30	1 750	70 000	
Batteries Li-Ion (15 kWh)		15	900	36 000	
Chaudière biomasse (8 kW)		20	1500	60 000	
<b>Total</b>			<b>5 750</b>	<b>230 000</b>	

- **Type 2** : Panneaux photovoltaïques, batteries, **électrolyseur et pile à hydrogène**. L'hydrogène assure une autonomie sans intervention, en garantissant un approvisionnement continu même en hiver. Cependant, cette solution implique un investissement initial élevé et des pertes énergétiques importantes lors des conversions successives.

Équipement	Prix	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	Coût total sur 40 ans
Panneaux solaires 5m <sup>2</sup>		20	1250	50 000	
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)		30	1 600	64 000	
Batteries Li-Ion (15 kWh)		15	900	36 000	
Électrolyseur + pile à hydrogène (3 kW)		20	2000	80 000	
<b>Total</b>			<b>5 750</b>	<b>230 000</b>	

Le choix entre ces deux approches repose sur un arbitrage entre coût, autonomie et simplicité d'exploitation. Un foyer acceptant une gestion active et une légère adaptation de sa consommation peut opter pour une solution sans hydrogène, réduisant ainsi de plus de 30 % le coût de revient en exploitant pleinement la puissance stockée. À l'inverse, ceux recherchant une indépendance totale sans contrainte notamment en hiver privilégieront l'hydrogène, malgré un surcoût important.

## 2. Comparaison entre habitat autonome et habitat connecté aux réseaux sur 40 Ans

La transition énergétique et l'urbanisation croissante soulèvent la question de la viabilité économique et environnementale des infrastructures résidentielles. Ce chapitre analyse les coûts totaux et l'empreinte carbone des maisons autonomes, qui produisent leur propre énergie et gèrent leurs propres ressources sur 40 ans, par rapport aux maisons connectées aux réseaux centralisés, qui dépendent des infrastructures publiques.

### 2.1. Comparaison des coûts entre autonomie et raccordement au réseau en France

Le coût de construction est un élément essentiel dans la rentabilité d'une habitation. Une maison autonome implique un investissement initial plus élevé en raison de l'intégration de technologies permettant l'autoproduction énergétique et la gestion des ressources, comme les panneaux solaires, les batteries et les systèmes de récupération d'eau de pluie. À l'inverse, une maison connectée au réseau bénéficie de coûts de construction réduits, puisque son approvisionnement énergétique repose sur une infrastructure collective financée par des taxes et impôts.

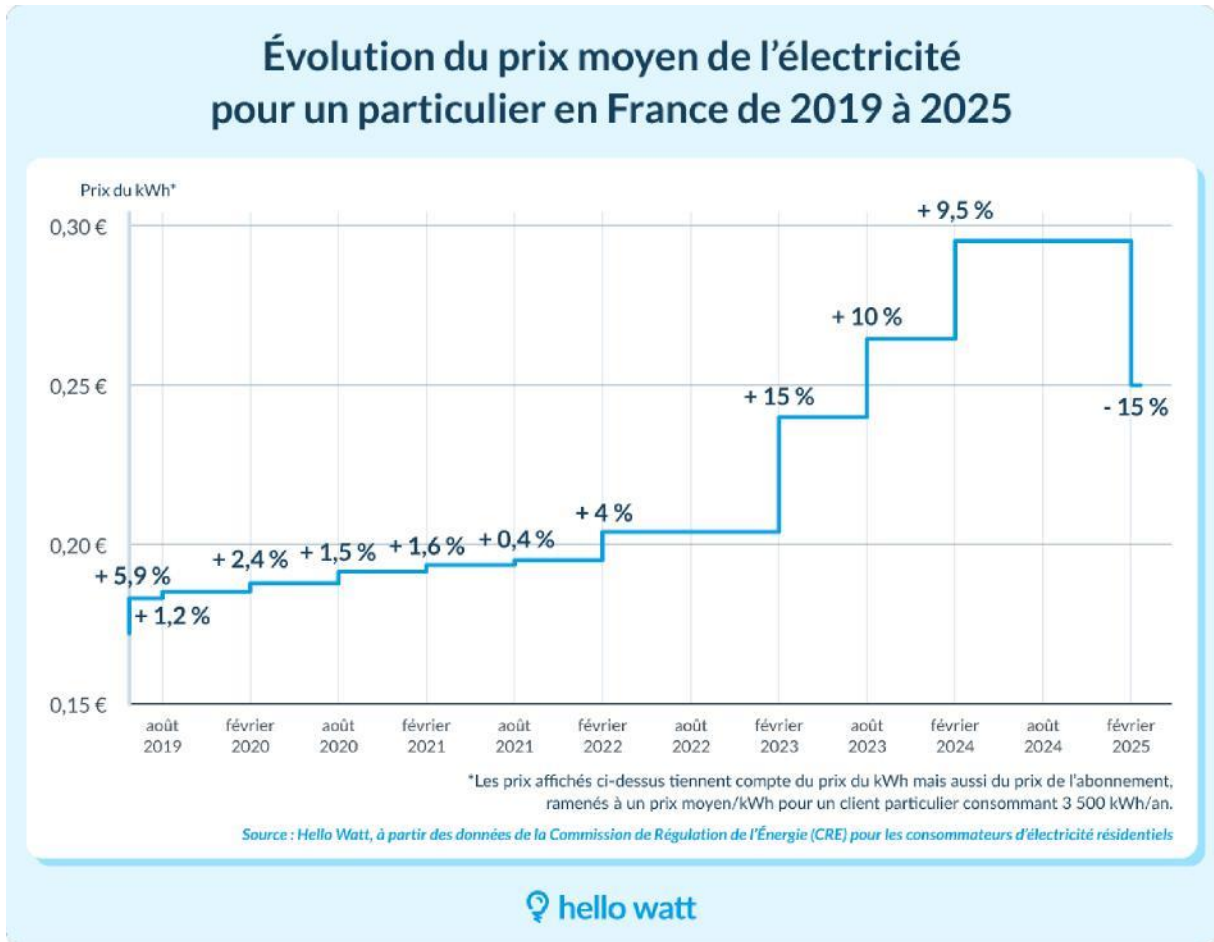
Pour comparer ces deux modèles, nous supposons que les coûts de construction des bâtiments eux-mêmes sont équivalents entre une maison classique construite sur fondation en béton, avec en parpaing, enduit et toiture traditionnelle, et une maison autonome fabriquée hors site selon des standards PassivHaus avec des matériaux en bois et une conception standardisée. Ainsi, nous nous concentrons uniquement sur le coût lié à l'autonomie énergétique.

En France, le mix énergétique repose principalement sur l'énergie nucléaire, suivie de l'hydroélectricité. Ces deux sources représentent la majorité de la production électrique, tandis que les autres énergies, comme l'éolien, le solaire ou le gaz, contribuent à hauteur d'environ 15 % avec des variations selon la demande et les conditions météorologiques. Ce mix énergétique évolue en temps réel et peut être consulté sur le site officiel<sup>14</sup> mentionné ci-dessous.



[Émissions CO2 de la consommation électrique en temps réel | App | Electricity Maps](#)

Sur le site [Electricity prices around the world | GlobalPetrolPrices.com](https://www.globalpetrolprices.com), le prix moyen du kWh a baissé passant de 0,30 à **0,25 €** depuis février 2025 en raison de l'augmentation de la production nucléaire française. Ces prix sont sujets à des variations et ont connu une hausse significative au fil des années, passant de 0,17 € en 2019 à 0,30 € en 2024.



Pour une maison passive sans solution de secours type pile à combustible (type 1), le coût du kWh sur 40 ans, en intégrant le remplacement des équipements après 20 ans et en appliquant une décote de 20 % sur les coûts de construction au moment du renouvellement, est estimé à **0,25 €/kWh**.

Figure 7a - Type 1- Coût économique de fabrication des équipements énergétiques

Type 1						
Équipement	Prix	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	Cout total sur 40 ans	€/kWh sur 40 ans
Panneaux solaires 5m <sup>2</sup>		20	1 600	64 000		0,06
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)		30	1 750	70 000		0,22
Batteries Li-Ion (15 kWh)		15	900	36 000		0,65
Chaudière biomasse (8 kW)		20	1500	60 000		0,24
<b>Total</b>			<b>5 750</b>	<b>230 000</b>		<b>0,25</b>

Pour une maison passive avec solution de pile à combustible (type 2) et dans les mêmes conditions, le prix du kWh est de **0.38 €/kWh**.

Figure 7b - Type 2 - Coût économique de fabrication des équipements énergétiques -

Type 2						
Équipement	Prix	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	Cout total sur 40 ans	€/kWh sur 40 ans
Panneaux solaires 5m <sup>2</sup>		20	1250	50 000		0,07
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)		30	1 600	64 000		0,24
Batteries Li-Ion (15 kWh)		15	900	36 000		0,65
Électrolyseur + pile à hydrogène (3 kW)		20	2000	80 000		0,56
<b>Total</b>			<b>5 750</b>	<b>230 000</b>		<b>0,38</b>

Pour mémoire, la facture moyenne par foyer en France est de 2000 à 2500 € par an, ce qui revient entre 80 000 et 100 000 € pour 40 ans (chapitre 1.1).

La production d'énergie en maison autonome est surabondante, mais dans la solution 1, seule une fraction de cette énergie est réellement exploitée en raison d'une capacité de stockage limitée à 15 kWh, entraînant une perte significative de l'excédent produit. En revanche, la solution 2 permet une utilisation plus efficace grâce à un système de stockage plus performant, capable de conserver jusqu'à 4 400 kWh supplémentaires. Cette optimisation ouvre la possibilité d'alimenter des usages complémentaires tels que des véhicules ou vélos à hydrogène, augmentant ainsi la quantité d'énergie valorisée au-delà des 5 750 kWh annuels initialement consommés de 2646 kWh annuels pour un total de 8396 kWh annuel (ce scénario sera repris sous la dénomination type 2\* pour la suite du rapport).

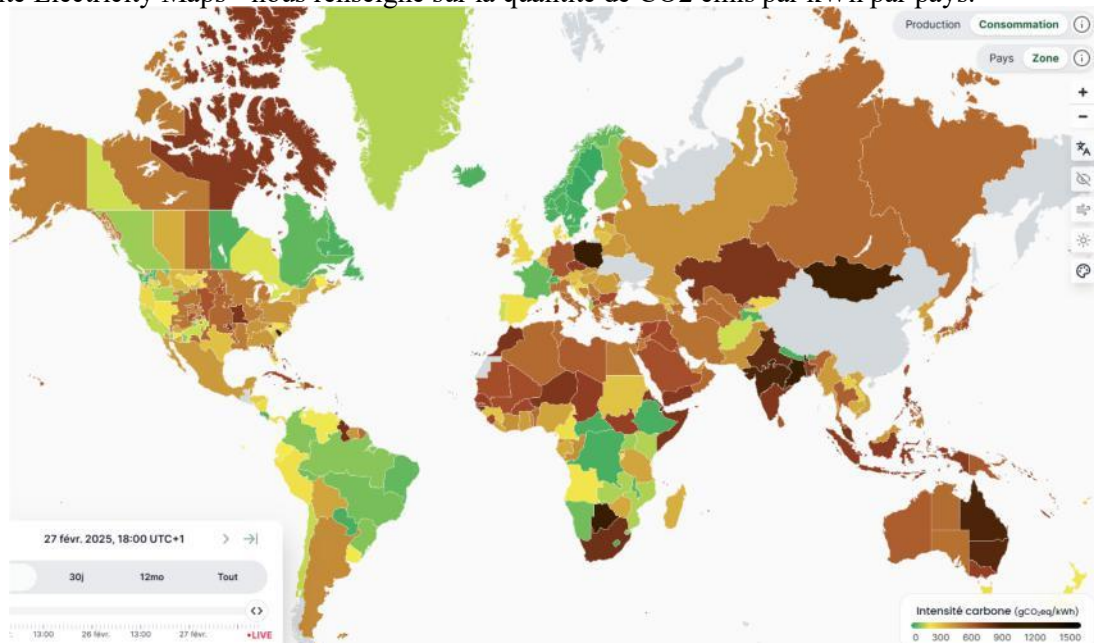
Avec cette amélioration, le coût du kWh peut être réduit d'un facteur proche de 1.5, rendant la maison autonome plus compétitive par rapport aux tarifs de l'électricité du réseau. Ce type 2\* exploitant la totalité de l'énergie produite aurait un cout du kWh de **0.26 €/kWh** (+2646 kWh utilisé).

En conclusion, le coût du kWh produit en maison autonome varie entre **0,25 et 0,38 €/kWh**, avec des marges d'optimisation significatives qui permettent d'atteindre un niveau inférieur au prix moyen de l'électricité en France et sans prendre en compte les coûts indirects liés à la réalisation et à l'entretien du réseau. Ces coûts indirects, difficiles à quantifier précisément, incluent l'infrastructure nécessaire à l'acheminement de l'électricité (trottoirs, raccordements, terrassements, réseau de distribution...), dont une partie du financement est pris en charge par l'État sous forme de dépenses publiques non directement répercutées sur la facture des consommateurs. On peut estimer qu'environ 10 % du coût réel de l'électricité en France ne figure pas dans le prix payé par les usagers mais est supporté par les finances publiques.

Dans ces conditions, la maison autonome apparaît économiquement viable en France, avec un coût du kWh comparable au réseau voir inférieur si les ressources produites sont parfaitement exploitées. Toutefois, elle nécessite un investissement initial conséquent, qui constitue le principal frein à son adoption à grande échelle.

## 2.2. Comparaison de l'intensité carbone entre un habitat autonome et une maison raccordée au réseau en France

Le site Electricity Maps<sup>17</sup> nous renseigne sur la quantité de CO2 émis par kWh par pays.



[Émissions CO2 de la consommation électrique en temps réel | App | Electricity Maps](#)

L'intensité carbone du mix énergétique de la France renseigné sur ce site est de 58g CO<sub>2</sub>/kWh et les documentations de l'ADEM précise les éléments suivants rapportés à la consommation de l'habitat autonome pris en référence de 5750 kWh annuel :

Source d'énergie	Part du mix (%)	Besoin annuel (kWh)	Besoin total sur 40 ans (kWh)	CO <sub>2</sub> /kWh (gCO <sub>2</sub> e/kWh)	CO <sub>2</sub> total sur 40 ans (kg)
Nucléaire	66%	3795	151800	8,5	1290,3
Hydroélectrique	10%	575	23000	13	299
Éolien terrestre	8%	460	18400	7,5	138
Éolien offshore	2%	115	4600	11	50,6
Solaire photovoltaïque (au sol)	6%	345	13800	50	690
Solaire photovoltaïque (toiture)	1%	57,5	2300	65	149,5
Gaz naturel (cogénération)	5%	287,5	11500	500	5750
Charbon	1%	57,5	2300	925	2127,5
Fioul	1%	57,5	2300	800	1840
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>5750</b>	<b>230000</b>		<b>12334,9</b>

Ce qui donne **54 gCO<sub>2</sub>/kWh** a pondéré de **+10%** pour la distribution soit **59 gCO<sub>2</sub>/kWh**. Les valeurs sont recoupées.

Concernant **le bilan carbone de fabrication** des équipements de production énergétique, les données sont largement discutables en fonction du pays de fabrication, des matériaux employés et des méthodes de fabrication. Les données ci-dessous sont moyennées suivant différentes sources et recoupement mais la variabilité dépasse les 50%<sup>19</sup>.

Figure 8 - Tableau final des équipements avec hypothèses, valeurs retenues et sources vérifiées

Équipement	Quantité	Unité	Hypothèses à prendre en compte	kgCO <sub>2</sub> /u associé (min-max)	kgCO <sub>2</sub> /u associé retenu	Durée de vie retenue (ans)	Valeur retenue (kgCO <sub>2</sub> )	Source	Explication
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)	8,5	kWc	Silicium, verre, aluminium, durée de vie 25-30 ans, mix de production UE/Chine	480-810 kg/kWc	580	30	4 930	Fraunhofer ISE (2022)	"Les émissions varient selon le site de production : 810 kgCO <sub>2</sub> /kWc en Chine, 580 kgCO <sub>2</sub> /kWc en UE."
Panneaux solaires thermiques (5m <sup>2</sup> )	5	m <sup>2</sup>	Capteur plan vitré pour ECS, rendement 70%, faible impact carbone	150-300 kg/m <sup>2</sup>	200	20	1 000	Open University (2021)	Une installation solaire thermique a une empreinte carbone inférieure au photovoltaïque.
Batteries Li-ion (15 kWh)	15	kWh	Lithium, cobalt, nickel, fabrication haute énergie	30-200 kg/kWh	100	10	1 500	MIT Climate Portal (2022)	Une batterie Li-ion a un impact très variable selon les matériaux et le site de fabrication.
Électrolyseur (3 kW)	3	kW	Acier inoxydable, membranes polymères, catalyseurs	67-150 kg/kW	100	15	300	Fraunhofer ISE (2019)	L'empreinte des électrolyseurs PEM varie entre 67 et 150 kgCO <sub>2</sub> /kW. Une valeur médiane de 100 kgCO <sub>2</sub> /kW est retenue.
Pile à hydrogène (3 kW)	3	kW	PEM, platine, acier, composite	50-100 kg/kW	100	10	300	Fraunhofer ISE (2019)	Les piles à hydrogène piles à hydrogène nécessitent des matériaux rares et coûteux en carbone. La fourchette varie entre 90 et 120 kgCO <sub>2</sub> /kW, une moyenne de 100 kgCO <sub>2</sub> /kW est retenue.
Chaudière biomasse (8 kW)	8	kW (thermique)	Chaudière à granulés/bois (acier, fonte, isolants); Énergie grise liée à l'acier et composants. Impact sensible à la taille (industrielle vs domestique).	~10-50 kg CO <sub>2</sub> /kW (pour la fabrication, suivant taille installation)	30	20	300	ADEME (2023)	L'empreinte carbone des chaudières biomasse dépend des matériaux utilisés. Une fourchette entre 40 et 55 kgCO <sub>2</sub> /kW est identifiée

Pour un habitat autonome de type 1, l'intensité carbone est :

Figure 6a - Type 1 - Coût carbone de fabrication des équipements énergétiques

Type 1						
Équipement	CO <sub>2</sub> Fabrication Initiale (kg)	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	CO <sub>2</sub> Total sur 40 ans (kg) avec abattement de 20%	KGCO <sub>2</sub> /kWh sur 40 ans (kgCO <sub>2e</sub> )
Panneaux solaires	1 000	20	1 600	64 000	1 800	0,04
Chaudière biomasse (8 kW)	300	20	1 500	60 000	540	0,01
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)	4 930	30	1 750	70 000	6 245	0,09
Batteries Li-Ion (15 kWh)	1 500	15	900	36 000	3 500	0,10
<b>Total</b>	<b>7 730</b>		<b>5 750</b>	<b>230 000</b>	<b>12 085</b>	<b>0,053</b>

Soit **53 gCO<sub>2</sub>/kWh**. Et pour le type 2 :

Figure 6b - Type 2 - Coût carbone de fabrication des équipements énergétiques

Type 2						
Équipement	CO <sub>2</sub> Fabrication Initiale (kg)	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	CO <sub>2</sub> Total sur 40 ans (kg) avec abattement de 20%	KGCO <sub>2</sub> /kWh sur 40 ans (kgCO <sub>2e</sub> )
Panneaux solaires	1 000	20	1 250	50 000	1 800	0,04
Électrolyseur + pile à hydrogène (3 kW)	600	20	2 000	80 000	1 080	0,01
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)	4 930	30	1 600	64 000	6 245	0,10
Batteries Li-Ion (15 kWh)	1 500	15	900	36 000	3 500	0,10
<b>Total</b>	<b>8 030</b>		<b>5 750</b>	<b>230 000</b>	<b>12 625</b>	<b>0,055</b>

Soit **55 gCO<sub>2</sub>/kWh** ou même jusqu'à **38 gCO<sub>2</sub>/kWh** si la totalité de l'énergie décarboné produite était utilisée pour d'autres usages suivant le Type 2\* (voir figure 9).

Ainsi, l'habitat autonome génère environ autant voire moins de CO<sub>2</sub> par kWh que le mix énergétique français.

### 2.3. Conclusion du comparatif économique et environnemental entre un habitat autonome et une maison raccordée au réseau dans le monde

En croisant les données sur l'intensité carbone par kWh<sup>17</sup> et le prix de l'électricité dans le monde en 2024<sup>16</sup>, puis en les comparant aux performances de l'habitat autonome selon les solutions précédemment évoquées, il est possible d'identifier les pays où cette alternative présente un double avantage, à la fois économique et environnemental.

Cela concerne environ 14 % des pays, où l'habitat autonome se révèle compétitif tant sur le plan financier que sur celui des émissions de CO2. Si l'on se concentre uniquement sur l'aspect économique, la proportion s'élève à 16 % des pays. En considérant uniquement la dimension environnementale, la liste s'élargit encore, avec 88 % des pays affichant un coût carbone par kWh supérieur à celui des solutions autonomes étudiées (figure 9 – extrait des principaux pays où la solution est la plus pertinente à capacité de production équivalente).

**Figure 9 -Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique**

**Type 1 :** Panneaux solaires, chaudière biomasse, panneaux photovoltaïques, batterie

Cette configuration repose sur l'utilisation combinée de :

Panneaux solaires thermiques : pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage.

Chaudière biomasse : utilisant des matières organiques renouvelables (comme le bois) pour le chauffage, offrant une source d'énergie locale et renouvelable.

Panneaux photovoltaïques : pour la production d'électricité à partir de l'énergie solaire.

Batteries de stockage : pour stocker l'électricité produite en excédent et la restituer en période de faible production solaire.

**Type 2 :** Panneaux solaires, électrolyseur, pile à hydrogène, panneaux photovoltaïques, batterie

Cette configuration intègre des technologies avancées pour une autonomie énergétique accrue :

Panneaux solaires thermiques et photovoltaïques : similaires au Type 1, pour la production de chaleur et d'électricité.

Électrolyseur : utilise l'électricité excédentaire pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau, permettant un stockage d'énergie à long terme.

Système de stockage d'hydrogène : conserve l'hydrogène produit pour une utilisation ultérieure.

Pile à combustible : convertit l'hydrogène stocké en électricité et en chaleur lorsque la demande énergétique est supérieure à la production solaire.

Batteries de stockage : pour une gestion efficace de l'électricité à court terme.

**Le Type 2\*** est une extension du Type 2, visant à maximiser l'utilisation de l'énergie produite en surplus (+2646Kwh).

Utilisation de l'énergie excédentaire : l'énergie supplémentaire produite, au-delà des besoins de la maison, est utilisée pour alimenter d'autres applications, telles que véhicules à hydrogène ou appareils électroménagers fonctionnant à l'hydrogène ou à l'électricité.

gCO2/kWh	€/kWh	
Type 1	53	0,25
Type 2	55	0,38
Type 2*	38	0,26

Figure 9 -Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique

Prix de l'électricité résidentiel par pays en Juin 2024		Intensité carbone de l'électricité consommée	CO2			€		
Pays	Euros/kWh		gCO2/kWh	Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*	Delta type	Delta Type 2
New Zealand	0,185	141	-88	-86	-103	0,06	0,19	0,07
Gabon	0,188	319	-266	-264	-281	0,06	0,19	0,07
Burkina Faso	0,189	600	-547	-545	-562	0,06	0,19	0,07
Slovakia	0,193	297	-244	-242	-259	0,05	0,19	0,07
Sweden	0,194	23	30	32	15	0,05	0,18	0,07
Greece	0,195	296	-243	-241	-258	0,05	0,18	0,06
Lebanon	0,196	172	-119	-117	-134	0,05	0,18	0,06
Mali	0,201	564	-511	-509	-526	0,04	0,18	0,06
Aruba	0,201					0,04	0,18	0,06
Colombia	0,207	90	-37	-35	-52	0,04	0,17	0,05
Belize	0,208	246	-193	-191	-208	0,04	0,17	0,05
Luxembourg	0,21	381	-328	-326	-343	0,04	0,17	0,05
Japan	0,212	499	-446	-444	-461	0,03	0,17	0,05
Spain	0,214	132	-79	-77	-94	0,03	0,16	0,05
El Salvador	0,214					0,03	0,16	0,05
Slovenia	0,217	306	-253	-251	-268	0,03	0,16	0,04
Poland	0,217	775	-722	-720	-737	0,03	0,16	0,04
Honduras	0,221	342	-289	-287	-304	0,02	0,16	0,04
Uruguay	0,225	97	-44	-42	-59	0,02	0,15	0,03
Portugal	0,23	74	-21	-19	-36	0,02	0,15	0,03
Singapore	0,232	651	-598	-596	-613	0,01	0,15	0,03
Australia	0,235	450	-397	-395	-412	0,01	0,14	0,02
Lithuania	0,24	223	-170	-168	-185	0,01	0,14	0,02
Netherlands	0,24	386	-333	-331	-348	0,01	0,14	0,02
Sierra Leone	0,242	380	-327	-325	-342	0,00	0,14	0,02
Latvia	0,244	328	-275	-273	-290	0,00	0,13	0,02
Kenya	0,245	100	-47	-45	-62	0,00	0,13	0,01
Estonia	0,253	421	-368	-366	-383	-0,01	0,13	0,01
Jamaica	0,279	495	-442	-440	-457	-0,03	0,10	-0,02
France	0,283	58	-5	-3	-20	-0,04	0,10	-0,02
Guatemala	0,283					-0,04	0,10	-0,02
Austria	0,29	249	-196	-194	-211	-0,04	0,09	-0,03
Cyprus	0,29	536	-483	-481	-498	-0,04	0,09	-0,03
Barbados	0,306	670	-617	-615	-632	-0,06	0,07	-0,05
Denmark	0,307	170	-117	-115	-132	-0,06	0,07	-0,05
Czech Republic	0,314	594	-541	-539	-556	-0,07	0,06	-0,05
Italy	0,322	484	-431	-429	-446	-0,08	0,06	-0,06
UK	0,332	269	-216	-214	-231	-0,09	0,05	-0,07
Bahamas	0,335	700	-647	-645	-662	-0,09	0,04	-0,08
Cape Verde	0,336	692	-639	-637	-654	-0,09	0,04	-0,08
Belgium	0,348	234	-181	-179	-196	-0,10	0,03	-0,09
Ireland	0,348	423	-370	-368	-385	-0,10	0,03	-0,09
Switzerland	0,364	28	25	27	10	-0,12	0,01	-0,10
Germany	0,367	491	-438	-436	-453	-0,12	0,01	-0,11
Liechtenstein	0,367					-0,12	0,01	-0,11
Cayman Islands	0,389	697	-644	-642	-659	-0,14	-0,01	-0,13
Bermuda	0,443					-0,20	-0,06	-0,18

Toutefois, cette analyse comporte certaines limites méthodologiques. Les performances de l'habitat autonome ont été évaluées sur un modèle standardisé basé en Île-de-France, alors que les conditions d'ensoleillement, de climat et de ressources varient considérablement à l'échelle mondiale. Une comparaison plus fine nécessiterait de prendre en compte les différences de latitude, d'ensoleillement annuel et de températures saisonnières, qui influencent directement l'efficacité des panneaux solaires, les besoins en chauffage et le besoin de stockage.

À titre de référence, la latitude de l'Île-de-France (~48,9°N) est proche de celle de certaines régions des États-Unis (New York, Chicago), de la Chine (Pékin, Tianjin) et de l'Inde du Nord (New Delhi, Lucknow). Cependant, d'autres pays ayant un mix énergétique fortement carboné, bénéficient d'un ensoleillement plus intense et plus régulier, rendant potentiellement l'habitat autonome encore plus compétitif dans ces régions.

Ainsi, bien que les tendances globales montrent un intérêt certain pour l'autonomie énergétique, la variabilité des contextes climatiques et énergétiques imposera une approche locale plus détaillée, afin de déterminer la réelle pertinence de ce modèle dans chaque pays.

#### **2.4. Externalités positives**

L'habitat autonome offre de multiples avantages, notamment en matière de préservation des espaces naturels, de liberté individuelle, de réduction des coûts publics et de résilience énergétique. En éliminant le besoin de raccordement aux réseaux traditionnels, il limite l'artificialisation des sols et la fragmentation des écosystèmes, contribuant ainsi à la préservation de la biodiversité et facilitant l'infiltration des eaux pluviales. Cette absence de réseaux lourds réduit également la nécessité d'infrastructures coûteuses telles que les trottoirs, les raccordements ou les terrassements, diminuant ainsi l'impact environnemental des nouvelles constructions.

L'autonomie énergétique confère aux habitants une indépendance vis-à-vis des infrastructures publiques et des fluctuations du marché de l'énergie, tout en réduisant les charges fixes des ménages. Sans contrainte de raccordement, les individus peuvent s'établir en dehors des zones densément peuplées et adopter des modes de vie alignés sur des principes écologiques et économiques durables. La flexibilité architecturale et l'intégration de technologies adaptées favorisent un mode de vie résilient, capable de s'ajuster aux évolutions climatiques et énergétiques.

Sur le plan économique, l'habitat autonome allège la pression sur les finances publiques en limitant les besoins d'investissement dans les réseaux de distribution d'électricité, d'eau et d'assainissement. Il réduit les coûts d'entretien des infrastructures existantes et diminue la dépendance aux services publics, tout

en encourageant le développement de filières locales spécialisées dans les énergies renouvelables, l'auto construction et la gestion optimisée des ressources. Cette approche stimule l'innovation dans le secteur du bâtiment et favorise la création d'emplois dans des domaines techniques liés à l'efficacité énergétique et à la gestion autonome de l'eau et de l'électricité.

En termes de résilience, l'habitat autonome diminue la vulnérabilité aux pannes de réseau et aux crises énergétiques. En cas de catastrophes naturelles ou de tensions sur l'approvisionnement, il assure une continuité d'usage et réduit la dépendance aux infrastructures centralisées. Son développement progressif pourrait contribuer à désengorger les réseaux nationaux, limiter les surcharges électriques et proposer une alternative viable aux modèles d'habitat traditionnels. Néanmoins, l'investissement initial demeure un obstacle majeur, bien que compensé à long terme par une réduction des coûts de fonctionnement et une meilleure maîtrise des ressources.

Comme le souligne la thèse "Habitation écologique et dispersion bâtie : les habitats alternatifs comme vecteurs de transition socio-écologique"<sup>18</sup>, ces projets d'habitat alternatif constituent des espaces privilégiés pour expérimenter des modes de vie écologiques, contribuant ainsi à réduire l'empreinte écologique des sociétés. Ces initiatives, souvent situées en marge des zones urbanisées, permettent de tester de nouvelles pratiques architecturales et sociales, favorisant une transition vers des modes de vie plus durables. Elles offrent également une alternative à la densification urbaine, en proposant des habitats respectueux de l'environnement et intégrés dans leur milieu naturel. Ainsi, ces habitats alternatifs jouent un rôle crucial dans la transformation écologique des territoires et des modes de vie.

## CONCLUSION - LIMITES ET PERSPECTIVES

L'habitat autonome est aujourd'hui une alternative crédible, alliant technologie, résilience et indépendance énergétique. Il permet de subvenir aux besoins en eau et en électricité sans recourir aux réseaux, offrant ainsi une liberté d'implantation. Son coût de production énergétique au kWh est comparable à celui du réseau français, avec un bilan carbone estimé à 50 gCO<sub>2</sub>/kWh, en dessous de la moyenne du mix énergétique national. À l'échelle mondiale, l'habitat autonome basé sur les conditions françaises affiche une empreinte carbone plus faible que le mix électrique local dans 88 % des pays. Cependant, il ne devient économiquement plus avantageux que dans 16 % des pays et ne cumule un double bénéfice financier et environnemental que dans 14 % des cas, une tendance qui reste à nuancer au regard des disparités locales en matière d'ensoleillement et de disponibilité des ressources en eau.

Son essor remet en question l'écosystème des fournisseurs d'énergie et d'eau ainsi que des acteurs immobiliers, les incitant à compléter leur offre par un modèle économique axé sur des services décentralisés, incluant l'installation, la gestion et l'entretien des équipements résidentiels. En parallèle, le développement de l'habitat autonome entraînerait une augmentation significative de la demande en services de maintenance spécialisés, transformant durablement les métiers liés à l'entretien des systèmes énergétiques domestiques.

L'habitat autonome questionne également la redéfinition des zones habitables. Avec un accès suffisant à l'eau et au soleil, des territoires jusqu'alors inhospitaliers, comme les massifs montagneux, les forêts ou les côtes escarpées, pourraient devenir habitables sans artificialisation des sols, offrant ainsi une alternative plus respectueuse de l'environnement par rapport à l'urbanisation traditionnelle.

Enfin, la question de la résilience aux crises est centrale. Face aux pannes de réseau, aux sécheresses ou aux tensions énergétiques, un habitat autonome offre une continuité d'usage et un contrôle accru des ressources essentielles. Toutefois, son déploiement à grande échelle est encore freiné par des barrières réglementaires, technologiques et économiques.

S'il constitue aujourd'hui une solution viable pour les zones reculées, l'habitat autonome reste une niche en attente d'un véritable écosystème industriel et commercial. Son essor dépendra de la capacité du secteur immobilier et énergétique à structurer une offre adaptée et accessible, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives géographiques, économiques et environnementales.

Mais au-delà des considérations techniques et économiques, il pose aussi la question d'une reconnexion à son environnement, d'un mode de vie plus ancré dans les cycles naturels et plus conscient de son interaction avec l'écosystème dans lequel il s'insère.

## ANNEXE 1 – Figures

### Explication du tableau - Figure 1 : Besoin énergétique

Figure 1 - Besoin énergétique

Poste énergétique	Consommation annuelle estimée (kWh)	Catégorie d'Énergie
Chauffage	1 500 kWh/an	Chaleur
Eau chaude sanitaire	1 600 kWh/an	Eau chaude
Équipements électriques	2 650 kWh/an	Électricité
<b>Total besoin en énergie</b>	<b>5 750 kWh/an</b>	Tt énergies

Ce tableau présente la répartition des besoins énergétiques annuels d'un habitat autonome en fonction des principaux postes de consommation.

- Chauffage (1 500 kWh/an) : Cette valeur correspond à la consommation nécessaire pour maintenir une température intérieure confortable, en supposant une isolation performante conforme aux standards des maisons passives.
- Eau chaude sanitaire (1 600 kWh/an) : Estimation de l'énergie requise pour chauffer l'eau utilisée par une famille de 4 personnes, basée sur une consommation moyenne de 50 litres d'eau chaude par jour et par personne.
- Équipements électriques (2 650 kWh/an) : Inclut l'ensemble des besoins électriques de l'habitat, tels que l'éclairage, les appareils électroménagers, la cuisson et les équipements électroniques.
- Total besoin en énergie (5 750 kWh/an) : Cette valeur représente l'ensemble des besoins énergétiques du foyer sur une année, répartis entre la production de chaleur, d'eau chaude et d'électricité.

Ce tableau constitue une base de référence pour dimensionner les systèmes de production et de stockage énergétique d'un habitat autonome.

## Explication du tableau - Figure 2 : Répartition des besoins en énergie

Figure 2 - Répartition des besoins en énergie

Kwh/an	Besoin Annuel	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Répartition annuelle du besoin en chauffage		19%	16%	14%	7%	3%	2%	1%	1%	2%	5%	10%	20%
Chauffage	1500	285	240	210	105	45	30	15	15	30	75	150	300
Eau chaude sanitaire	1600	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133
Équipements électriques	2650	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
	5750	638	593	563	458	398	383	368	368	383	428	503	653

Ce tableau détaille la répartition mensuelle des besoins énergétiques de l'habitat autonome en fonction des trois postes de consommation identifiés : chauffage, eau chaude sanitaire et équipements électriques.

- Répartition annuelle du chauffage : Le chauffage représente 19 % des besoins en janvier et 16 % en février, puis diminue fortement jusqu'à l'été où il devient négligeable avant de remonter à l'approche de l'hiver.
- Eau chaude sanitaire : La consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire reste quasi stable tout au long de l'année, autour de 133 kWh/mois.
- Équipements électriques : Cette consommation est constante sur l'année, avec une moyenne de 220 kWh/mois, légèrement plus élevée en hiver du fait d'un usage plus important de l'éclairage. Ce tableau permet d'ajuster la production énergétique en fonction des variations saisonnières de la demande.

## Explication du tableau - Figure 3 : Production énergétique nécessaire

Figure 3 - Production énergétique nécessaire - en rouge les besoins en eau chaude insatisfaits par les panneaux solaires - en vert les compléments d'eau chaude pris en charge par la chaudière biomasse

Kwh/an	Production annuelle	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Photovoltaïque SUD	7085,6	276,8	400	618,4	779,2	800	800	831,2	773,6	683,2	508	336,8	278,4
Répartition mensuelle de la production des panneaux solaires		4%	6%	7%	10%	13%	14%	14%	13%	9%	5%	3%	2%
Panneaux solaires	1750	70	105	123	175	228	245	245	228	158	88	53	35
Chaudière biomasse	1770	348	288	210	105	45	30	15	15	30	75	231	398
	10605	695	773	951	1059	1073	1075	1091	1016	871	671	620	711

Ce tableau présente la production énergétique mensuelle de l'habitat autonome et son adaptation aux besoins.

- Production photovoltaïque (7085,6 kWh/an) : La production varie fortement selon les saisons. Elle est plus élevée entre mai et août (environ 800 kWh/mois) et plus faible en hiver (276 kWh en janvier).
- Répartition de l'apport solaire thermique : La part d'énergie couverte par les panneaux solaires thermiques pour l'eau chaude sanitaire est indiquée en rouge lorsque l'apport est insuffisant et en vert lorsqu'il est compensé par la chaudière biomasse.
- Production de la chaudière biomasse : Elle prend le relais lorsque les panneaux solaires ne suffisent pas à chauffer l'eau, particulièrement en hiver.

Ce tableau met en évidence la nécessité d'un stockage énergétique pour lisser la production et éviter les déficits en hiver.



## Explication du tableau - Figure 6 : Coût carbone de fabrication des équipements énergétiques

Figure 6a - Type 1 - Coût carbone de fabrication des équipements énergétiques

Équipement	Type 1						Type 2					
	CO <sub>2</sub> Fabrication Initiale (kg)	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	CO <sub>2</sub> Total sur 40 ans (kg) avec abattement de 20%	KGCO <sub>2</sub> /kWh sur 40 ans (kgCO <sub>2</sub> e)	CO <sub>2</sub> Fabrication Initiale (kg)	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	CO <sub>2</sub> Total sur 40 ans (kg) avec abattement de 20%	KGCO <sub>2</sub> /kWh sur 40 ans (kgCO <sub>2</sub> e)
Panneaux solaires	1 000	20	1 600	64 000	1 800	0,04	1 000	20	1250	50 000	1 800	0,04
Chaudière biomasse (8 kW)	300	20	1500	60 000	540	0,01	600	20	2000	80 000	1 080	0,01
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)	4 930	30	1 750	70 000	6 245	0,09	4 930	30	1 600	64 000	6 245	0,10
Batteries Li-Ion (15 kWh)	1 500	15	900	36 000	3 500	0,10	1 500	15	900	36 000	3 500	0,10
<b>Total</b>	<b>7 730</b>		<b>5 750</b>	<b>230 000</b>	<b>12 085</b>	<b>0,053</b>	<b>8 030</b>		<b>5 750</b>	<b>230 000</b>	<b>12 625</b>	<b>0,055</b>

Ce tableau compare l’empreinte carbone de fabrication des équipements nécessaires pour les deux modèles d’habitat autonome (Type 1 et Type 2). Il calcule leur contribution à l’empreinte carbone globale du système sur 40 ans et rapporte cette empreinte à la production totale d’énergie pour obtenir un ratio en kgCO<sub>2</sub>/kWh.

Colonnes principales :

- La quantité de CO<sub>2</sub> émise lors de la fabrication de chaque équipement est indiquée en kg de CO<sub>2</sub>.
- La durée de vie de chaque équipement est précisée, influençant le nombre de remplacements nécessaires sur 40 ans.
- La consommation annuelle d’énergie associée à chaque équipement est ensuite multipliée par 40 ans pour obtenir le besoin énergétique total sur la durée de vie.
- Enfin, un abattement de 20 % est appliqué sur l’empreinte carbone globale pour tenir compte des potentiels gains d’efficacité dans la production industrielle des équipements à long terme lors du remplacement.

Différence entre Type 1 et Type 2 :

- Le modèle Type 1 utilise une chaudière biomasse et des batteries Li-Ion pour le stockage.
- Le modèle Type 2 intègre un électrolyseur et une pile à hydrogène, ce qui augmente légèrement l’empreinte carbone de fabrication, mais permet un stockage de l’énergie sur des périodes plus longues.

Résultat final :

- Le coût carbone moyen de l’énergie produite est estimé à 0,053 kgCO<sub>2</sub>/kWh pour le Type 1 et 0,055 kgCO<sub>2</sub>/kWh pour le Type 2, illustrant que l’ajout d’un système hydrogène ne modifie pas de manière significative l’empreinte carbone totale.

## Explication du tableau - Figure 7 : Coût économique de fabrication des équipements énergétiques

Figure 7a - Type 1- Coût économique de fabrication des équipements énergétiques

Figure 7b - Type 2 - Coût économique de fabrication des équipements énergétiques -

Type 1						Type 2							
Équipement	Prix	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	Coût total sur 40 ans	€/kWh sur 40 ans	Équipement	Prix	Durée de Vie (ans)	Besoin Annuel (kWh)	Besoin Total sur 40 ans (kWh)	Coût total sur 40 ans	€/kWh sur 40 ans
Panneaux solaires 5m <sup>2</sup>		20	1 600	64 000		0,06	Panneaux solaires 5m <sup>2</sup>		20	1250	50 000		0,07
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8,5 kWc)		30	1 750	70 000		0,22	Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8,5 kWc)		30	1 600	64 000		0,24
Batteries Li-Ion (15 kWh)		15	900	36 000		0,65	Batteries Li-Ion (15 kWh)		15	900	36 000		0,65
Chaudière biomasse (8 kW)		20	1500	60 000		0,24	Électrolyseur + pile à hydrogène (3 kW)		20	2000	80 000		0,56
<b>Total</b>			<b>5 750</b>	<b>230 000</b>		<b>0,25</b>	<b>Total</b>			<b>5 750</b>	<b>230 000</b>		<b>0,38</b>

Ce tableau détaille le coût économique des équipements nécessaires à chaque modèle de maison autonome et permet de calculer le coût du kWh produit sur 40 ans.

Colonnes principales :

- Le prix d'achat de chaque équipement est précisé en euros.
- La durée de vie détermine si un équipement doit être remplacé au cours des 40 ans de fonctionnement du système.
- Comme pour le tableau carbone, la consommation annuelle est utilisée pour calculer le besoin énergétique total sur 40 ans.
- Le coût total de chaque équipement sur cette période est ensuite rapporté à la production totale d'énergie, afin d'obtenir le coût en €/kWh.

Différence entre Type 1 et Type 2 :

- Le modèle Type 1, basé sur batteries Li-Ion et biomasse, a un investissement initial plus faible et un coût du kWh de 0,25 €/kWh.
- Le modèle Type 2, intégrant hydrogène et électrolyseur, présente un investissement initial bien plus élevé, avec un coût du kWh atteignant 0,38 €/kWh. Résultat final :
  - Le coût du kWh du Type 2 est nettement plus élevé, en raison du prix des équipements hydrogène.
  - L'énergie stockée via des batteries dans le Type 1 est plus compétitive économiquement, bien que nécessitant une gestion active de l'approvisionnement en biomasse.

Ce tableau permet d'évaluer la rentabilité économique des différents scénarios avec des robustesses différentes et de comparer le coût du kWh produit par rapport aux tarifs de l'électricité du réseau.

## Explication du tableau - Figure 8 : Coût carbone de construction des équipements

Figure 8 - Tableau final des équipements avec hypothèses, valeurs retenues et sources vérifiées

Équipement	Quantité	Unité	Hypothèses à prendre en compte	kgCO <sub>2</sub> /u associé (min-max)	kgCO <sub>2</sub> /u associé retenu	Durée de vie retenue (ans)	Valeur retenue (kgCO <sub>2</sub> )	Source	Explication
Panneaux photovoltaïques (30m <sup>2</sup> , 8.5 kWc)	8,5	kWc	Silicium, verre, aluminium, durée de vie 25-30 ans, mix de production UE/Chine	480–810 kg/kWc	580	30	4 930	Fraunhofer ISE (2022)	Les émissions varient selon le site de production : 810 kgCO <sub>2</sub> /kWc en Chine, 580 kgCO <sub>2</sub> /kWc en UE. "
Panneaux solaires thermiques (5m <sup>2</sup> )	5	m <sup>2</sup>	Capteur plan vitré pour ECS, rendement 70%, faible impact carbone	150-300 kg/m <sup>2</sup>	200	20	1 000	Open University (2021)	Une installation solaire thermique a une empreinte carbone inférieure au photovoltaïque.
Batteries Li-Ion (15 kWh)	15	kWh	Lithium, cobalt, nickel, fabrication haute énergie	30–200 kg/kWh	100	10	1 500	MIT Climate Portal (2022)	Une batterie Li-ion a un impact très variable selon les matériaux et le site de fabrication.
Électrolyseur (3 kW)	3	kW	Acier inoxydable, membranes polymères, catalyseurs	67-150 kg/kW	100	15	300	Fraunhofer ISE (2019)	L'empreinte des électrolyseurs PEM varie entre <b>67 et 150 kgCO<sub>2</sub>/kW</b> . Une valeur médiane de <b>100 kgCO<sub>2</sub>/kW</b> est retenue.
Pile à hydrogène (3 kW)	3	kW	PEM, platine, acier, composite	50–100 kg/kW	100	10	300	Fraunhofer ISE (2019)	Les piles à hydrogène nécessitent des matériaux rares et coûteux en carbone. La fourchette varie entre 80 et 120 kgCO <sub>2</sub> /kW, une moyenne de <b>100 kgCO<sub>2</sub>/kW</b> est retenue.
Chaudière biomasse (8 kW)	8	kW (thermique)	Chaudière à granulés/bois (acier, fonte, isolants); Énergie grise liée à l'acier et composants. Impact sensible à la taille (industrielle vs domestique).	~10–50 kg CO <sub>2</sub> /kW (pour la fabrication, suivant taille installation)	30	20	300	ADEME (2023)	L'empreinte carbone des chaudières biomasse dépend des matériaux utilisés. Une fourchette entre <b>40 et 55 kgCO<sub>2</sub>/kW</b> est identifiée

Ce tableau synthétise les hypothèses, valeurs retenues et sources utilisées pour estimer l'empreinte carbone de fabrication des équipements nécessaires à l'autonomie énergétique. Il regroupe les informations sur chaque composant du système, permettant une justification transparente des données employées dans l'analyse.

Colonnes principales :

- Quantité et unité : Correspond à la puissance ou la surface installée de chaque équipement.
- Hypothèses à prendre en compte : Détaille les matériaux et facteurs influençant l'impact carbone.
- kgCO<sub>2</sub>/unité (min-max) : Fourchette issue des études et bases de données de référence.
- kgCO<sub>2</sub>/unité retenu : Valeur médiane ou justifiée pour les calculs.
- Durée de vie : Estimation en années, influençant les remplacements sur 40 ans.
- Valeur retenue (kgCO<sub>2</sub>) : Multiplication des unités par la valeur retenue.
- Source et lien : Références académiques et industrielles justifiant les données.
- Explication : Justifie les choix méthodologiques et interprète les valeurs utilisées.

L’empreinte carbone des équipements présentés dans ce tableau n’est pas une valeur fixe et invariable. Elle dépend fortement de plusieurs facteurs contextuels, qui peuvent modifier significativement les résultats finaux :

#### Mix énergétique du pays de production

- La fabrication d’un équipement dans un pays où l’électricité est majoritairement issue du charbon ou du gaz (ex. Chine, Inde) génère une empreinte carbone nettement plus élevée que dans un pays où le mix est fortement décarboné (ex. France, Norvège).
- Par exemple, le silicium des panneaux photovoltaïques nécessite une forte consommation d’électricité, et son empreinte carbone varie selon le pays où il est raffiné.

#### Distance et mode de transport

- L’acheminement des équipements (par cargo, camion ou avion) impacte également leur coût carbone.
- Un équipement fabriqué localement dans une zone où l’industrie est décarbonée aura un impact moindre qu’un équipement importé de Chine en cargo et transporté sur plusieurs milliers de kilomètres.

#### Optimisation et efficacité industrielle

- Certains fabricants ont mis en place des procédés plus économes en énergie et en ressources.
- L’amélioration des techniques de production peut réduire l’empreinte carbone au fil du temps, ce qui rend les valeurs retenues ici susceptibles d’évoluer.

#### Fin de vie et recyclabilité

- L’intégration d’un taux de recyclage élevé peut réduire l’empreinte globale, notamment pour les équipements utilisant des matériaux stratégiques (lithium, acier, aluminium, platine).
- Certains composants peuvent être réutilisés ou valorisés, limitant ainsi l’impact carbone d’un nouvel équipement.

Les valeurs retenues ici correspondent à des estimations moyennes issues de la littérature scientifique et industrielle, mais elles ne doivent pas être considérées comme universelles et définitives. Dans une approche plus fine, il serait pertinent de pondérer les résultats en fonction du lieu de fabrication, des filières d’approvisionnement et des conditions spécifiques de transport et de fin de vie.

## **Explication du tableau - Figure 9 - Comparaison internationale du coût et de l'empreinte carbone du kWh**

Ce tableau présente une analyse comparative entre le coût de l'électricité et son empreinte carbone pour différents pays en 2024.

Il inclut :

- Le prix du kWh résidentiel dans chaque pays.
- L'intensité carbone de l'électricité consommée en gCO<sub>2</sub>/kWh.
- Le différentiel carbone entre le mix électrique du pays et celui des solutions d'habitat autonome (Type 1 et Type 2).
- Le différentiel économique, exprimant la compétitivité de l'habitat autonome par rapport aux coûts de l'électricité locale.

Les résultats montrent que :

- Dans 88 % des pays, l'habitat autonome est plus sobre en CO<sub>2</sub> que le réseau électrique.
- Dans 16 % des pays, il est plus économique que l'électricité locale.
- Dans 14 % des cas, il présente simultanément un avantage écologique et financier.

Des pays comme les États-Unis, la Chine et l'Inde figurent parmi ceux où l'habitat autonome aurait le plus d'intérêt environnemental, alors que des pays à faible empreinte carbone comme la Suède ou la Suisse bénéficient déjà d'un réseau bas-carbone.

Ce tableau met en avant l'impact déterminant du mix énergétique local et du prix de l'électricité sur la viabilité d'un modèle autonome.

**Figure 9 -Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique**

**Type 1 :** Panneaux solaires, **chaudière biomasse**, panneaux photovoltaïques, batterie

Cette configuration repose sur l'utilisation combinée de :

Panneaux solaires thermiques : pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage.

Chaudière biomasse : utilisant des matières organiques renouvelables (comme le bois) pour le chauffage, offrant une source d'énergie locale et renouvelable.

Panneaux photovoltaïques : pour la production d'électricité à partir de l'énergie solaire.

Batteries de stockage : pour stocker l'électricité produite en excédent et la restituer en période de faible production solaire.

**Type 2 :** Panneaux solaires, électrolyseur, **pile à hydrogène**, panneaux photovoltaïques, batterie

Cette configuration intègre des technologies avancées pour une autonomie énergétique accrue :

Panneaux solaires thermiques et photovoltaïques : similaires au Type 1, pour la production de chaleur et d'électricité.

Électrolyseur : utilise l'électricité excédentaire pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau, permettant un stockage d'énergie à long terme.

Système de stockage d'hydrogène : conserve l'hydrogène produit pour une utilisation ultérieure.

Pile à combustible : convertit l'hydrogène stocké en électricité et en chaleur lorsque la demande énergétique est supérieure à la production solaire.

Batteries de stockage : pour une gestion efficace de l'électricité à court terme.

**Le Type 2\*** est une extension du Type 2, visant à maximiser l'utilisation de l'énergie produite en surplus (+2646Kwh). Dans cette configuration :

Utilisation de l'énergie excédentaire : l'énergie supplémentaire produite, au-delà des besoins de la maison, est utilisée pour alimenter d'autres applications, telles que véhicules à hydrogène ou appareils électroménagers fonctionnant à l'hydrogène ou à l'électricité.

	gCO2/kWh	€/kWh
Type 1	5,9	0,24
Type 2	6,2	0,37
Type 2*	42	0,25

**Figure 9 - Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique**

Prix de l'électricité résidentiel par pays en Juin 2024		Intensité carbone de l'électricité consommée gCO2/kWh	CO2			€		
Pays	Euros/kWh		Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*	Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*
Zimbabwe	0,001	306	-253,458	-251,11	268,41	0,24	0,38	0,26
Iran	0,002	482	-429,458	-427,11	444,41	0,24	0,38	0,26
Ethiopia	0,003	24	28,54203	30,8899	13,59	0,24	0,38	0,26
Cuba	0,005	616	-563,458	-561,11	578,41	0,24	0,37	0,25
Sudan	0,006	235	-182,458	-180,11	197,41	0,24	0,37	0,25
Libya	0,008	527	-474,458	-472,11	489,41	0,24	0,37	0,25
Angola	0,012	168	-115,458	-113,11	130,41	0,23	0,37	0,25
Kirgystan	0,014	46	6,542029	8,88986	8,41	0,23	0,36	0,25
Iraq	0,014	563	-510,458	-508,11	525,41	0,23	0,36	0,25
Bhutan	0,014	24	28,54203	30,8899	13,59	0,23	0,36	0,25
Egypt	0,017	419	-366,458	-364,11	381,41	0,23	0,36	0,24
Syria	0,018	610	-557,458	-555,11	572,41	0,23	0,36	0,24
Birmanie	0,018	332	-279,458	-277,11	294,41	0,23	0,36	0,24
Zambia	0,019	83	-30,458	-28,11	45,41	0,23	0,36	0,24
Oman	0,025	460	-407,458	-405,11	422,41	0,22	0,35	0,23
Laos	0,026	256	-203,458	-201,11	218,41	0,22	0,35	0,23
Qatar	0,03	468	-415,458	-413,11	430,41	0,22	0,35	0,23
Nigeria	0,032				37,59	0,21	0,35	0,23
Algeria	0,038	480	-427,458	-425,11	442,41	0,21	0,34	0,22
Uzbekistan	0,04	474	-421,458	-419,11	436,41	0,21	0,34	0,22
Nepal	0,04	24	28,54203	30,8899	13,59	0,21	0,34	0,22
Kuwait	0,043	570	-517,458	-515,11	532,41	0,20	0,34	0,22
Turkey	0,043	521	-468,458	-466,11	483,41	0,20	0,34	0,22
Venezuela	0,044	138	-85,458	-83,11	100,41	0,20	0,33	0,22
Azerbaïjan	0,045	467	-414,458	-412,11	429,41	0,20	0,33	0,21
Bahrain	0,046	488	-435,458	-433,11	450,41	0,20	0,33	0,21
Malaysia	0,048	570	-517,458	-515,11	532,41	0,20	0,33	0,21
Paraguay	0,049	25	27,54203	29,8899	12,59	0,20	0,33	0,21
Trinidad & Tobago	0,049	491	-438,458	-436,11	453,41	0,20	0,33	0,21
Afghanistan	0,05	193	-140,458	-138,11	155,41	0,20	0,33	0,21
Saudi Arabia	0,051	561	-508,458	-506,11	523,41	0,19	0,33	0,21
Kazakhstan	0,054	640	-587,458	-585,11	602,41	0,19	0,32	0,21
DR Congo	0,055	411	-358,458	-356,11	373,41	0,19	0,32	0,20
Suriname	0,056	394	-341,458	-339,11	356,41	0,19	0,32	0,20
Argentina	0,057	481	-428,458	-426,11	443,41	0,19	0,32	0,20
Georgia	0,057	319	-266,458	-264,11	281,41	0,19	0,32	0,20
Russia	0,059	382	-329,458	-327,11	344,41	0,19	0,32	0,20
Ukraine	0,06				37,59	0,19	0,32	0,20

**Figure 9 - Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique**

Prix de l'électricité résidentiel par pays en Juin 2024		Intensité carbone de l'électricité consommée gCO2/kWh	CO2			€		
Pays	Euros/kWh		Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*	Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*
Bangladesh	0,061	633	-580,458	-578,11	595,41	0,18	0,32	0,20
Tunisia	0,063	459	-406,458	-404,11	421,41	0,18	0,32	0,20
Pakistan	0,066	373	-320,458	-318,11	335,41	0,18	0,31	0,19
Vietnam	0,07	307	-254,458	-252,11	269,41	0,18	0,31	0,19
Malawi	0,071	43	9,542029	11,8899	5,41	0,17	0,31	0,19
China	0,072	536	-483,458	-481,11	498,41	0,17	0,31	0,19
India	0,072	656	-603,458	-601,11	618,41	0,17	0,31	0,19
Belarus	0,074	378	-325,458	-323,11	340,41	0,17	0,30	0,19
UAE	0,076	348	-295,458	-293,11	310,41	0,17	0,30	0,18
Cameroon	0,076	162	-109,458	-107,11	124,41	0,17	0,30	0,18
Indonesia	0,084	641	-588,458	-586,11	603,41	0,16	0,29	0,18
Tanzania	0,085	331	-278,458	-276,11	293,41	0,16	0,29	0,17
Jordan	0,086	296	-243,458	-241,11	258,41	0,16	0,29	0,17
Botswana	0,088	817	-764,458	-762,11	779,41	0,16	0,29	0,17
Bosnia & Herz.	0,089	549	-496,458	-494,11	511,41	0,16	0,29	0,17
Taiwan	0,091	472	-419,458	-417,11	434,41	0,15	0,29	0,17
Mexico	0,092	416	-363,458	-361,11	378,41	0,15	0,29	0,17
Ecuador	0,093	170	-117,458	-115,11	132,41	0,15	0,29	0,17
Lesotho	0,095	24	28,54203	30,8899	13,59	0,15	0,28	0,16
Hungary	0,097	232	-179,458	-177,11	194,41	0,15	0,28	0,16
Dom. Rep.	0,104	593	-540,458	-538,11	555,41	0,14	0,27	0,16
Ghana	0,104	346	-293,458	-291,11	308,41	0,14	0,27	0,16
Armenia	0,105	232	-179,458	-177,11	194,41	0,14	0,27	0,15
Maldives	0,106	679	-626,458	-624,11	641,41	0,14	0,27	0,15
Morocco	0,113	645	-592,458	-590,11	607,41	0,13	0,27	0,15
Canada	0,113	130	-77,458	-75,11	92,41	0,13	0,27	0,15
Albania	0,118	61	-8,45797	-6,1101	23,41	0,13	0,26	0,14
N. Maced.	0,118	715	-662,458	-660,11	677,41	0,13	0,26	0,14
Madagascar	0,119	274	-221,458	-219,11	236,41	0,13	0,26	0,14
Brazil	0,119	59	-6,45797	-4,1101	21,41	0,13	0,26	0,14
Moldova	0,12	386	-333,458	-331,11	348,41	0,13	0,26	0,14
Serbia	0,121	590	-537,458	-535,11	552,41	0,12	0,26	0,14
Mozambique	0,121	104	-51,458	-49,11	66,41	0,12	0,26	0,14
Swaziland	0,121	68	-15,458	-13,11	30,41	0,12	0,26	0,14
Ivory Coast	0,122	410	-357,458	-355,11	372,41	0,12	0,26	0,14
Thailand	0,122	499	-446,458	-444,11	461,41	0,12	0,26	0,14
South Korea	0,125	375	-322,458	-320,11	337,41	0,12	0,25	0,13
Mauritius	0,127	576	-523,458	-521,11	538,41	0,12	0,25	0,13
Sri Lanka	0,129	499	-446,458	-444,11	461,41	0,12	0,25	0,13
Bulgaria	0,132	542	-489,458	-487,11	504,41	0,11	0,25	0,13

**Figure 9 -Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique**

Prix de l'électricité résidentiel par pays en Juin 2024		Intensité carbone de l'électricité consommée gCO2/kWh	CO2			€		
Pays	Euros/kWh		Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*	Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*
Malta	0,134	486	-433,458	-431,11	448,41	0,11	0,24	0,13
Namibia	0,134	46	6,542029	8,88986	8,41	0,11	0,24	0,13
Norway	0,143	29	23,54203	25,8899	8,59	0,10	0,24	0,12
Cambodia	0,145	354	-301,458	-299,11	316,41	0,10	0,23	0,11
Macao	0,15	316	-263,458	-261,11	278,41	0,10	0,23	0,11
Croatia	0,15	199	-146,458	-144,11	161,41	0,10	0,23	0,11
Iceland	0,157	28	24,54203	26,8899	9,59	0,09	0,22	0,10
Romania	0,151	344	-291,458	-289,11	306,41	0,09	0,23	0,11
Chile	0,161	338	-285,458	-283,11	300,41	0,08	0,22	0,10
Finland	0,165	94	-41,458	-39,11	56,41	0,08	0,21	0,09
Panama	0,166	140	-87,458	-85,11	102,41	0,08	0,21	0,09
Senegal	0,167	572	-519,458	-517,11	534,41	0,08	0,21	0,09
Nicaragua	0,168	153	-100,458	-98,11	115,41	0,08	0,21	0,09
Uganda	0,17	88	-35,458	-33,11	50,41	0,08	0,21	0,09
USA	0,171	399	-346,458	-344,11	361,41	0,07	0,21	0,09
South Africa	0,171	673	-620,458	-618,11	635,41	0,07	0,21	0,09
Costa Rica	0,172	27	25,54203	27,8899	10,59	0,07	0,21	0,09
Israel	0,172	477	-424,458	-422,11	439,41	0,07	0,21	0,09
Hong Kong	0,173	609	-556,458	-554,11	571,41	0,07	0,21	0,09
Rwanda	0,175	364	-311,458	-309,11	326,41	0,07	0,20	0,08
Peru	0,175	170	-117,458	-115,11	132,41	0,07	0,20	0,08
Togo	0,177	334	-281,458	-279,11	296,41	0,07	0,20	0,08
Philippines	0,181	605	-552,458	-550,11	567,41	0,06	0,20	0,08
New Zealand	0,185	141	-88,458	-86,11	103,41	0,06	0,19	0,07
Gabon	0,188	319	-266,458	-264,11	281,41	0,06	0,19	0,07
Burkina Faso	0,189	600	-547,458	-545,11	562,41	0,06	0,19	0,07
Slovakia	0,193	297	-244,458	-242,11	259,41	0,05	0,19	0,07
Sweden	0,194	23	29,54203	31,8899	14,59	0,05	0,18	0,07

**Figure 9 -Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique**

Prix de l'électricité résidentiel par pays en Juin 2024		Intensité carbone de l'électricité consommée gCO2/kWh	CO2			€		
Pays	Euros/kWh		Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*	Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*
Greece	0,195	296	-243,458	-241,11	- 258,41	0,05	0,18	0,06
Lebanon	0,196	172	-119,458	-117,11	- 134,41	0,05	0,18	0,06
Mali	0,201	564	-511,458	-509,11	- 526,41	0,04	0,18	0,06
Aruba	0,201				37,59	0,04	0,18	0,06
Colombia	0,207	90	-37,458	-35,11	- 52,41	0,04	0,17	0,05
Belize	0,208	246	-193,458	-191,11	- 208,41	0,04	0,17	0,05
Luxembourg	0,21	381	-328,458	-326,11	- 343,41	0,04	0,17	0,05
Japan	0,212	499	-446,458	-444,11	- 461,41	0,03	0,17	0,05
Spain	0,214	132	-79,458	-77,11	- 94,41	0,03	0,16	0,05
El Salvador	0,214				37,59	0,03	0,16	0,05
Slovenia	0,217	306	-253,458	-251,11	- 268,41	0,03	0,16	0,04
Poland	0,217	775	-722,458	-720,11	- 737,41	0,03	0,16	0,04
Honduras	0,221	342	-289,458	-287,11	- 304,41	0,02	0,16	0,04
Uruguay	0,225	97	-44,458	-42,11	- 59,41	0,02	0,15	0,03
Portugal	0,23	74	-21,458	-19,11	- 36,41	0,02	0,15	0,03
Singapore	0,232	651	-598,458	-596,11	- 613,41	0,01	0,15	0,03
Australia	0,235	450	-397,458	-395,11	- 412,41	0,01	0,14	0,02
Lithuania	0,24	223	-170,458	-168,11	- 185,41	0,01	0,14	0,02
Netherlands	0,24	386	-333,458	-331,11	- 348,41	0,01	0,14	0,02
Sierra Leone	0,242	380	-327,458	-325,11	- 342,41	0,00	0,14	0,02
Latvia	0,244	328	-275,458	-273,11	- 290,41	0,00	0,13	0,02
Kenya	0,245	100	-47,458	-45,11	- 62,41	0,00	0,13	0,01
Estonia	0,253	421	-368,458	-366,11	- 383,41	-0,01	0,13	0,01
Jamaica	0,279	495	-442,458	-440,11	- 457,41	-0,03	0,10	- 0,02
France	0,283	58	-5,45797	-3,1101	- 20,41	-0,04	0,10	- 0,02
Guatemala	0,283				37,59	-0,04	0,10	- 0,02
Austria	0,29	249	-196,458	-194,11	- 211,41	-0,04	0,09	- 0,03
Cyprus	0,29	536	-483,458	-481,11	- 498,41	-0,04	0,09	- 0,03
Barbados	0,306	670	-617,458	-615,11	- 632,41	-0,06	0,07	- 0,05
Denmark	0,307	170	-117,458	-115,11	- 132,41	-0,06	0,07	- 0,05
Czech Republic	0,314	594	-541,458	-539,11	- 556,41	-0,07	0,06	- 0,05
Italy	0,322	484	-431,458	-429,11	- 446,41	-0,08	0,06	- 0,06
UK	0,332	269	-216,458	-214,11	- 231,41	-0,09	0,05	- 0,07
Bahamas	0,335	700	-647,458	-645,11	- 662,41	-0,09	0,04	- 0,08
Cape Verde	0,336	692	-639,458	-637,11	- 654,41	-0,09	0,04	- 0,08
Belgium	0,348	234	-181,458	-179,11	- 196,41	-0,10	0,03	- 0,09
Ireland	0,348	423	-370,458	-368,11	- 385,41	-0,10	0,03	- 0,09

Figure 9 -Tableau comparatif de l'énergie en € et gCO2/kWh entre habitat autonome et résidentiel classique								
Prix de l'électricité résidentiel par pays en Juin 2024		Intensité carbone de l'électricité consommée gCO2/kWh	CO2			€		
Pays	Euros/kWh		Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*	Delta type 1	Delta Type 2	Delta Type 2*
Switzerland	0,364	28	24,54	26,8899	9,59	-0,12	0,01	- 0,10
Germany	0,367	491	-438,458	-436,11	- 453,41	-0,12	0,01	- 0,11
Liechtenstein	0,367				37,59	-0,12	0,01	- 0,11
Cayman Islands	0,389	697	-644,458	-642,11	- 659,41	-0,14	-0,01	- 0,13
Bermuda	0,443				37,59	-0,20	-0,06	- 0,18

## SOURCES

Sources et documentations scientifiques					
Source	Nature	Prénom et Nom	Titre	Date	Lien
1	Scientifique	Chicoua Noubactep	Collecte des Eaux Pluviales - Un manuel de sensibilisation	01/09/2024	DOI: 10.13140/RG.2.2.19354.66246
2	Scientifique	Magnan, A, Daudier.M, Vannier.C & Delsol.G	« Changement climatique : anticiper pour s'adapter »	01/11/2020	<a href="https://lameteorologie.fr/admin/api/public/api/meteo/website/downloadArticlePDF/meteo_2020_11_11">https://lameteorologie.fr/admin/api/public/api/meteo/website/downloadArticlePDF/meteo_2020_11_11</a>
3	Scientifique	Emmanuelle Hellier.	La récupération domestique des eaux de pluie comme mode alternatif de gestion de l'eau : dimensions territoriales et enjeux urbanistiques actuels	01/02/2016	<a href="https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-11266680">https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-11266680</a>
4	Article	OMS	OMS (2022). Directives pour la qualité de l'eau potable	14/07/1905	<a href="https://iris.who.int/handle/10665/354109">https://iris.who.int/handle/10665/354109</a>
5	Article	Passive House	Passipedia - The Passive House Resource	-	<a href="https://passipedia.org/basics/what_is_a_passive_house">https://passipedia.org/basics/what_is_a_passive_house</a>
6	Scientifique	Baptiste Beguinat.	Le petit éolien auto-construit en France : focus sur l'appropriation de la technique	01/06/2024	<a href="https://shs.hal.science/halshs-04618528v1">https://shs.hal.science/halshs-04618528v1</a>
7	Scientifique	Andy Aniel Guerrero-Vélez, Katherine Lisbeth Carreño-Suárez, María Rodríguez-Autonomous Gamez, Antonio Vaquez-Pérez, Efrain Perez-Vega.	photovoltaic solar system for a home in the San Clemente Community. International Journal of Physical Sciences and Engineering	01/03/2024	<a href="https://doi.org/10.53730/ijpse.v8n1.14806">doi.org/10.53730/ijpse.v8n1.14806</a>
8	Scientifique	Mohammad Shakeri, Jagadeesh Pasupuleti, Abolfazi Mehdodniya, Nilofar Asim, Sieh Kiong Tiong, Foo Wah Low, Chong Tak Yaw	An Autonomous Home Energy Management System Using Dynamic Priority Strategy in Conventional Homes	01/05/2020	<a href="https://doi.org/10.3390/en13133312">doi.org/10.3390/en13133312</a>
9	Scientifique	Selçuk Emiralioglu, Secil Karatay, Faruk Erken	The Design and the Application of Off-Grid Solar Power System for a House in Kastamonu	01/06/2024	<a href="https://doi.org/10.61326/jaesci.v3i1.253">doi.org/10.61326/jaesci.v3i1.253</a>
10	Outil officiel		JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission		<a href="https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere">https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere</a>
11	Article		Travaux - Pourquoi et comment opter pour le chauffage solaire   Particuliers   Agir pour la transition écologique   ADEME		<a href="https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/chauffage/chauffage-solaire">https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/chauffage/chauffage-solaire</a>
12	Outil officiel		Données du temps d'ensoleillement par départements en France - data.gouv.fr		<a href="https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-du-temps-d-ensoleillement-par-departements-en-france/?utm_source=chatgpt.com">https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-du-temps-d-ensoleillement-par-departements-en-france/?utm_source=chatgpt.com</a>
13	Article		Trecobat expérimente l'hydrogène vert pour rendre ses maisons autonomes   Reportage TF1		<a href="https://www.trecobat.fr/reportage-1f1-trecobat-utilise-hydrogene-vert-pour-alimenter-ses-maisons/">https://www.trecobat.fr/reportage-1f1-trecobat-utilise-hydrogene-vert-pour-alimenter-ses-maisons/</a>
14	Outil officiel		éCO2mix - La production d'électricité par filière   RTE		<a href="https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere">https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere</a>
15	Article		Les solutions hydrogène pour le bâtiment.		<a href="https://www.hydrogene.org/uploads/sites/4/2024/01/Brochure-BATIMENT-2023-web-1.pdf">https://www.hydrogene.org/uploads/sites/4/2024/01/Brochure-BATIMENT-2023-web-1.pdf</a>
16	Outil officiel		Prix de l'énergie		<a href="https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/">https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/</a>
17	Outil officiel		Emission de CO2 dans le monde		<a href="https://app.electricitymaps.com/map/72h/hourly?lang=fr">https://app.electricitymaps.com/map/72h/hourly?lang=fr</a>
18	Scientifique	Ivan Mazel	Habitation écologique et dispersion bâtie : les " habitats alternatifs " comme expérimentations pour des transitions socioécologiques en territoires de moyenne montagne	17/04/2018	<a href="https://theses.hal.science/tel-01768270v1">https://theses.hal.science/tel-01768270v1</a>
19	Scientifique	Chrtian Reichel, Amelie Müller, Lorenz Friedrich, Sina Herceg, Max Mittag, Dirk	CO2 EMISSIONS OF SILICON PHOTOVOLTAIQUE MODULE	26/09/2022	Présenté at the WPCPEC-8
20	Scientifique	Zhongjian Kang and Shijie Liu	Research on Capacity Optimization Configuration of Renewable Energy Off Grid Hydrogen Production System Considering Collaborative Electrolysis	20/04/2024	<a href="https://doi.org/10.3390/en17081962">doi.org/10.3390/en17081962</a>
21	Scientifique	Dany Azig	Hydrogen mini-Factory for domestic purposes (wind version)	14/09/2023	DOI: 10.1038/s41598-023-40205-6
22	Scientifique	Xiaoliang Zhang	Optimisation strategy of off-grid wind and solar hydrogen production system based on reinforcement learning		10.1109/ICEPG63230.2024.10775476
23	Scientifique	Stephane OUELLETTE	MEND DE L'ENVIRONNEMENT, S OUELLETTE (2022). Pérenniser l'existant en habitat durable: l'amélioration des aménagements en multilogements HLM par la circularité des ressources. Université du Québec à Montréal (UQAM). Disponible en ligne : <a href="https://archipel.uqam.ca/15272/1/M17519.pdf">https://archipel.uqam.ca/15272/1/M17519.pdf</a> .	01/02/2022	<a href="https://archipel.uqam.ca/15272/1/M17519.pdf">https://archipel.uqam.ca/15272/1/M17519.pdf</a>
25	Scientifique	Carbon4	HYDROGÈNE BAS-CARBONE : QUELS USAGES PERTINENTS À MOYEN TERME DANS UN MONDE DÉCARBONÉ ?	01/01/2022	<a href="https://www.carbone4.com/files/Carbone_4_Etude_Hydrogene.pdf#:~:text=%5BPDF%5D%20Etude%20Hydrogene%20,%C3%A9lectrolyseur%20s%27%C3%A9%C3%A8ve%20%C3%A0%2038%20gC20e">https://www.carbone4.com/files/Carbone_4_Etude_Hydrogene.pdf#:~:text=%5BPDF%5D%20Etude%20Hydrogene%20,%C3%A9lectrolyseur%20s%27%C3%A9%C3%A8ve%20%C3%A0%2038%20gC20e</a>

## Articles sur l'habitat autonome et les réseaux décentralisés

Source	Nature	À retenir	Nom de l'article	Date	Lien
26	Article	8% perte réseaux - fragilité des réseaux - micro grille	Decentralized Energy Systems	19/01/2025	<a href="https://www.meegle.com/en_us/topics/sustainable-energy/decentralized-energy-systems?_sm_pdc=1&amp;_sm_rid=4nvvw41RrpZM6TWW1v1NqrFFWmPnw4vFHLTN#understanding-decentralized-energy-systems">https://www.meegle.com/en_us/topics/sustainable-energy/decentralized-energy-systems?_sm_pdc=1&amp;_sm_rid=4nvvw41RrpZM6TWW1v1NqrFFWmPnw4vFHLTN#understanding-decentralized-energy-systems</a>
27	Article	facteur économique - grille de taille réduite - impact des batteries (problème de stockage)	Energy Grid Systems: Centralized to Decentralized Shift		<a href="https://exedcdictionary.com/en-US/centralized-vs-decentralized-energy-grid-systems-which-is-the-future/">https://exedcdictionary.com/en-US/centralized-vs-decentralized-energy-grid-systems-which-is-the-future/</a>
28	Article	Loi favorise les grandes productions autonomes - coût initial élevé - question de l'hybridation et de la gestion des réseaux / pilotage entre production locale et générale.	Central Theme for Energy's Future: Decentralizing Power Generation	02/01/2025	<a href="https://www.powermag.com/central-theme-for-energy-future-decentralizing-power-generation/">https://www.powermag.com/central-theme-for-energy-future-decentralizing-power-generation/</a>
29	Article	En ligne avec l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050 - stockage résidentiel par batterie - technologie Power to x - électrolyseur hydrogène	Decentralized Energy and the Future of Sustainable Urban Development - European Future Energy Forum	16/01/2025	<a href="https://www.europeanfutureenergyforum.com/decentralized-energy-and-the-future-of-sustainable-urban-development/">https://www.europeanfutureenergyforum.com/decentralized-energy-and-the-future-of-sustainable-urban-development/</a>
30	Article	Exemple de vie communautaire hors réseau	10 Off-Grid Communities You Should Consider [2024 Updated] - Jackery	24/05/2024	<a href="https://www.jackery.com/blogs/lifestyle/off-grid-living-communities-to-consider">https://www.jackery.com/blogs/lifestyle/off-grid-living-communities-to-consider</a>
31	Article	« Les civilisations humaines ont exploité l'énergie éolienne comme source d'énergie mécanique pendant des millénaires. L'énergie éolienne est actuellement convertie en électricité. En 2020, la capacité éolienne mondiale a atteint 744 gigawatts (Source : WWEA). Générateur d'énergie portable »	Ultimate Guide to Off-Grid Power Solutions -Jackery	30/08/2023	<a href="https://www.jackery.com/blogs/knowledge/ultimate-guide-to-off-grid-power-solutions">https://www.jackery.com/blogs/knowledge/ultimate-guide-to-off-grid-power-solutions</a>
32	Scientifique	Bianchi, A., Ginelli, E. Impact local / Acceptabilité (courbe en U) - seules certaines communautés ont les contraintes ? Consensus culturel	The social dimension in energy landscapes   City, Territory and Architecture   Full Text	01/10/2018	<a href="https://doi.org/10.1186/s40410-018-0085-5">https://doi.org/10.1186/s40410-018-0085-5</a>
33	Article	Les systèmes énergétiques décentralisés sont une solution clé pour un avenir énergétique plus durable, autonome et résilient. Leur succès repose sur des politiques adaptées, l'implication des citoyens et l'innovation technologique. Création d'emploi. Collaboration public-privé. Batterie Lithium-ion	Decentralized Energy Systems: Benefits and Implementation Strategies   Inventia	26/11/2024	<a href="https://www.inventia.in/decentralized-energy-systems-benefits-and-implementation-strategies/">https://www.inventia.in/decentralized-energy-systems-benefits-and-implementation-strategies/</a>
34	Scientifique	WIPO - Lot of reference. Challenge rural - nourriture avec cuisine bois - récupération énergétique - incitation fiscale et	Green Technology Book: Energy Solutions for Climate Change - 2. Green urban energy solutions	16/07/1905	DOI 10.34667/tind.50132
35	Scientifique	Alli M. Adl , Yekang Ko. Inter- connexion de micro grid	(PDF) Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy	17/12/2015	<a href="https://www.academia.edu/91362846/Socio-technical_evolution_of_Decentralized_Energy_Systems_A_critical_review_and_implications_for_urban_planning_and_policy">https://www.academia.edu/91362846/Socio-technical_evolution_of_Decentralized_Energy_Systems_A_critical_review_and_implications_for_urban_planning_and_policy</a>
36	Scientifique	Définition off grid - initial cost - onduleur	Off-Grid Energy Solutions: Sustainable Power Anywhere	24/11/2024	<a href="https://www.consumerenergycenter.org/off-grid-energy-solutions/">https://www.consumerenergycenter.org/off-grid-energy-solutions/</a>
37	Scientifique	Hybridation entre global, micro-grid and local. La décentralisation énergétique transforme la production et la distribution d'énergie en ville, nécessitant une refonte des politiques urbaines et énergétiques pour optimiser les infrastructures, garantir l'équité sociale et renforcer la résilience climatique.	(1) Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy	08/07/1905	<a href="https://www.academia.edu/83035574/Socio-technical_evolution_of_Decentralized_Energy_Systems_A_critical_review_and_implications_for_urban_planning_and_policy">https://www.academia.edu/83035574/Socio-technical_evolution_of_Decentralized_Energy_Systems_A_critical_review_and_implications_for_urban_planning_and_policy</a>
38	Scientifique	Complexité de l'interdépendance des systèmes de production d'énergie multi-sources. Complexité de l'interdépendance des systèmes de production d'énergie multi-sources	Smart energy systems for smart city districts: case study Reininghaus District   Energy, Sustainability and Society   Full Text	08/07/1905	<a href="https://energysustainsec.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-016-0085-9">https://energysustainsec.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-016-0085-9</a>
39	Article	Groupe de la banque mondiale - 8% de perte sur les réseaux électriques.	Pertes d'électricité lors de la transmission et de la distribution (% de la production)   Data	06/07/1905	<a href="https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EG.ELC.LOSS.ZS?utm_source=chatgpt.com">https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EG.ELC.LOSS.ZS?utm_source=chatgpt.com</a>
40	Article	International renewable environmental Agency	Une croissance record conforte l'avantage des énergies renouvelables en termes de coût	24/09/2024	<a href="https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Sep/Record-Growth-Drives-Cost-Advantage-of-Renewable-Power-FR?utm_source=chatgpt.com">https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Sep/Record-Growth-Drives-Cost-Advantage-of-Renewable-Power-FR?utm_source=chatgpt.com</a>
41	Article	Léger dimensionnement - générateur pour l'hiver - structure suivant héliodion avec serre d'hiver - penser à l'hybridation des systèmes - penser au secours en cas de maintenance des productions d'énergies renouvelable.	How to Power Remote Locations: Off-Grid Living Solutions - OffGridHarmony	10/08/2023	<a href="https://offgridharmony.com/how-to-power-remote-locations-off-grid-living-solutions/">https://offgridharmony.com/how-to-power-remote-locations-off-grid-living-solutions/</a>
42	Article	Point sur les différences de matériaux de construction.	Off Grid Homes: Revolutionizing Sustainable Living - Off Grid World	07/02/2023	<a href="https://offgridworld.com/off-grid-homes/">https://offgridworld.com/off-grid-homes/</a>
43	Article	Les énergies renouvelables hors réseau accélèrent l'accès à l'électricité et stimulent le développement économique	Off-grid Renewables are Growing, Bringing Socioeconomic Benefits to Millions	14/07/2018	<a href="https://www.irena.org/News/articles/2018/Jul/Off-grid-Renewables-are-Growing-Bringing-Socioeconomic-Benefits-to-Millions">https://www.irena.org/News/articles/2018/Jul/Off-grid-Renewables-are-Growing-Bringing-Socioeconomic-Benefits-to-Millions</a>
44	Article	L'hydroélectricité hors réseau assure une énergie continue, durable et adaptée aux habitats autonomes. Dépendance à l'eau, coût élevé, entretien, impact écologique, réglementation stricte, localisation spécifique.	Unlocking The Power Of Water: A Complete Guide To Off-Grid Hydroelectric Systems For Sustainable Living   Off Grid Destinations	14/08/2024	<a href="https://offgriddestinations.com/unlocking-the-power-of-water-a-complete-guide-to-off-grid-hydroelectric-systems-for-sustainable-living/">https://offgriddestinations.com/unlocking-the-power-of-water-a-complete-guide-to-off-grid-hydroelectric-systems-for-sustainable-living/</a>
45	Article	Le choix entre solaire et éolien dépend du climat, de l'espace, du budget	Solar vs Wind Energy: Which is Right for Your Home? - Green Energy Hub	15/07/1905	<a href="https://greenenergyhub.com/solar-vs-wind-energy/">https://greenenergyhub.com/solar-vs-wind-energy/</a>
46	Article	Deux analyses comparative sur la consommation carbone avec micro réseau	Off-Grid Energy: Spearheading Carbon Neutrality Strategies		<a href="https://positive.net.au/blog/off-grid-energy-and-carbon-strategies/">https://positive.net.au/blog/off-grid-energy-and-carbon-strategies/</a>
47	Article	Les petites maisons autonomes offrent durabilité, efficacité énergétique et indépendance, malgré défis réglementaires	Why Small Self-Sufficient Homes Are The Future Of Sustainable Living - OffGridHarmony		<a href="https://offgridharmony.com/why-small-self-sufficient-homes-are-the-future-of-sustainable-living/">https://offgridharmony.com/why-small-self-sufficient-homes-are-the-future-of-sustainable-living/</a>

Informations pour définir le poids carbone des équipements de production					
Source	Nature	Prénom et Nom	Titre	Date	Lien
1	Scientifique	Fraunhofer ISE	Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems	2022	<a href="https://www.ise.fraunhofer.de">https://www.ise.fraunhofer.de</a>
2	Scientifique	ADEME	Étude ACV des panneaux solaires photovoltaïques	2023	<a href="https://www.effv.fr/solaire/panneau-solaire-photovoltaique/bilan-carbone-panneau-solaire">https://www.effv.fr/solaire/panneau-solaire-photovoltaique/bilan-carbone-panneau-solaire</a>
3	Scientifique	ADEME	Étude sur les panneaux solaires thermiques	2022	<a href="https://www.ademe.fr">https://www.ademe.fr</a>
4	Scientifique	Open University	Renewable Energy Systems: Solar Thermal and PV	2021	<a href="https://www.open.ac.uk">https://www.open.ac.uk</a>
5	Scientifique	MIT Climate Portal	The Carbon Footprint of Lithium-Ion Batteries	2022	<a href="https://climate.mit.edu">https://climate.mit.edu</a>
6	Scientifique	Transport & Environment	ACV et empreinte carbone des batteries	2023	<a href="https://www.transportenvironment.org">https://www.transportenvironment.org</a>
7	Scientifique	Koj <i>et al.</i>	Carbon Footprint of Hydrogen Production via Electrolysis	2024	<a href="https://www.researchgate.net/figure/Carbon-footprint-of-hydrogen-production-via-water-electrolysis">https://www.researchgate.net/figure/Carbon-footprint-of-hydrogen-production-via-water-electrolysis</a>
8	Scientifique	Fraunhofer ISE	Comparative Analysis of Fuel Cell Systems	2019	<a href="https://www.ise.fraunhofer.de">https://www.ise.fraunhofer.de</a>
9	Scientifique	FCH-JU (EU Hydrogen)	Life Cycle Analysis of PEM Fuel Cells	2018	<a href="https://www.fch.europa.eu">https://www.fch.europa.eu</a>
10	Scientifique	IPCC	Carbon Footprint of Biomass Energy	2022	<a href="https://www.ipcc.ch">https://www.ipcc.ch</a>
11	Synthèse ACV	Biomasse France	Étude ACV des chaudières biomasse	2023	<a href="https://www.acv-biomasse.fr">https://www.acv-biomasse.fr</a>
12	Scientifique	IEA	Lifecycle CO <sub>2</sub> Emissions of Energy Technologies	2022	<a href="https://www.iea.org">https://www.iea.org</a>
13	Outil officiel	ADEME	Données ACV des équipements énergétiques	2023	<a href="https://www.ademe.fr">https://www.ademe.fr</a>
14	Outil officiel	ADEME	Données sur l'ensoleillement par région	2023	<a href="https://www.data.gouv.fr">https://www.data.gouv.fr</a>
15	Outil officiel	European Environment Agency	Émissions des technologies énergétiques	2022	<a href="https://www.eea.europa.eu">https://www.eea.europa.eu</a>

Cet état de l'art a été réalisé avec l'aide de l'IA Chat GPT 4.0.