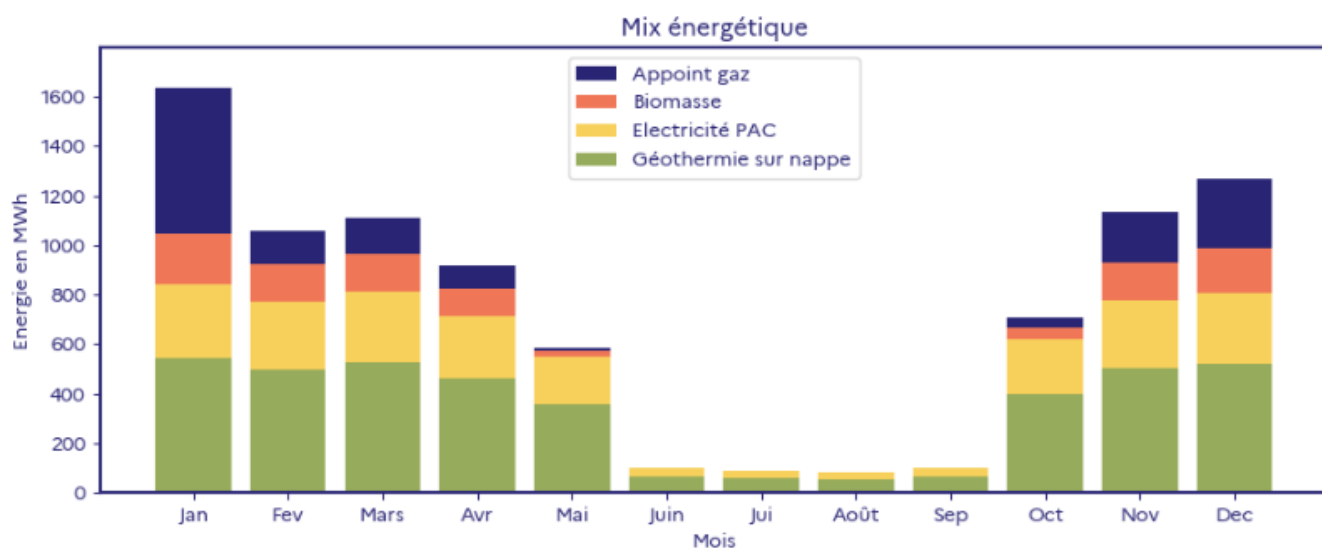


# SIMULATION DE MIX ÉNERGÉTIQUE POUR ALIMENTER UN RÉSEAU DE CHALEUR

## NOTE MÉTHODOLOGIQUE



Dans le cadre du projet EnRezo, le Cerema met à disposition un module complémentaire appelé « **MixEnR** » qui permet de simuler des mix énergétiques pour alimenter les réseaux de chaleur à développer.

Ce module en ligne permet d'explorer concrètement les combinaisons de sources d'énergies renouvelables et de récupération pouvant être mobilisées pour répondre aux besoins des réseaux de chaleur à développer (caractérisés par les zones d'opportunité). Il est l'objet du présent document.

Ce travail est soutenu et financé par la DGEC et l'ADEME.

## Introduction – rappel EnRezo

Les zones d'opportunité, établies dans le cadre du projet EnRezo, pour le développement des réseaux de chaleur et de froid ont vocation à aider les collectivités dans l'exercice de planification énergétique de leur territoire. Par une simple visualisation cartographique, il leur est possible d'identifier et de hiérarchiser les secteurs dans lesquels le développement d'un réseau de chaleur et/ou de froid est, *a priori*, techniquement possible.

Ces zones ont été construites sur la base d'une estimation des besoins en chaleur et en froid des bâtiments résidentiels et tertiaires. Les méthodes utilisées – estimation des besoins et création des zones d'opportunité – sont décrites dans les documents suivants :

[Besoins de chaleur et de froid – Note méthodologique](#)

[Zones d'opportunité – Note méthodologique](#)

## Introduction – MixEnR

Le module **MixEnR** vient compléter le projet EnRezo en apportant une réponse concrète à la question : « Comment alimenter un réseau de chaleur ? ». Alors qu'EnRezo identifie les zones d'opportunité les plus favorables au développement de réseaux de chaleur et de froid, MixEnR permet de simuler la répartition des différents systèmes de production d'énergie (comme une centrale biomasse, la géothermie ou le solaire thermique) pour couvrir les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire des bâtiments présents dans ces zones.

### Une modélisation basée sur l'estimation de la courbe de charge du réseau

La première étape de la simulation consiste à modéliser la demande énergétique horaire sur une année type, en fonction :

- de la localisation géographique (climat local),
- des secteurs d'activité présents (habitation, tertiaire, etc.) dans la zone d'opportunité.

Ce travail permet de modéliser la **courbe de charge** du réseau, c'est-à-dire l'évolution de la demande en énergie heure par heure. Ce profil est essentiel pour estimer le **pic de puissance** nécessaire, un élément central dans le dimensionnement des systèmes de production.

### Identifier les ressources disponibles et simuler un mix énergétique

La suite de la modélisation consiste à déterminer la puissance réellement mobilisable pour chaque source d'énergie, en tenant compte des conditions météorologiques (couverture nuageuse pour le solaire thermique) et des ressources réellement mobilisables à proximité du réseau. Par exemple, la présence d'une ressource géothermique ou d'un gisement de chaleur fatale à proximité conditionnent la faisabilité technique de ces moyens de production.

Une fois ces éléments connus, le module **MixEnR** peut alors répartir la charge entre les différentes technologies disponibles, selon plusieurs scénarios. Cette répartition constitue la **simulation de mix énergétiques**, en tenant compte à la fois des besoins du réseau et des ressources localement accessibles.

En outre, ce module permet de consolider l'étude d'opportunité, permise par EnRezo, en précisant les secteurs et les gisements d'énergie à étudier dans le cadre d'une étude de faisabilité.

## SOMMAIRE

1/ Estimation de la courbe de charge du réseau P.4

2/ Dimensionnement des systèmes de production P.6

3/ Simulation de mix énergétiques P.7



## 1/ Estimation de la courbe de charge du réseau

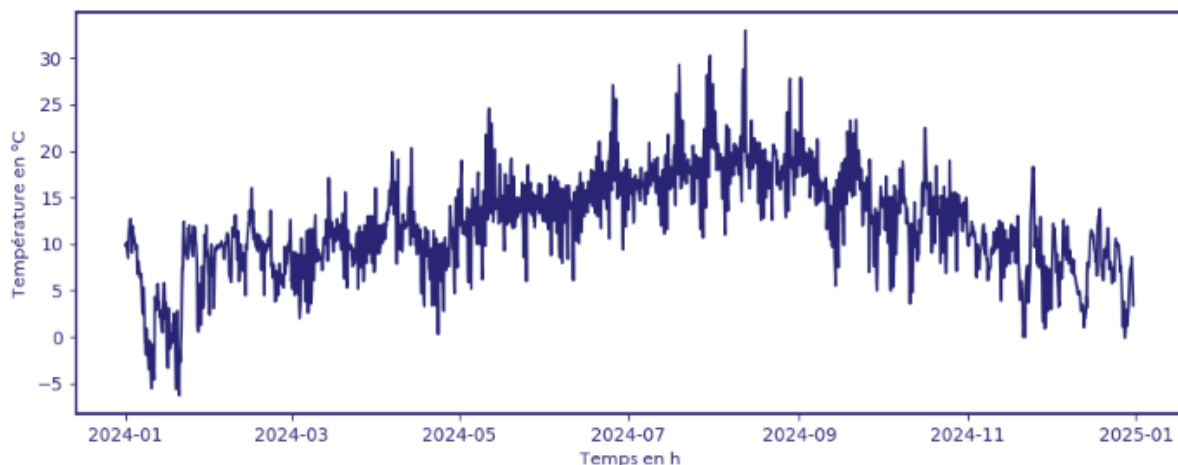
La courbe de charge d'un bâtiment varie en fonction de sa localisation géographique (conditions météorologiques) et de son usage (secteur d'activité tertiaire ou résidentiel).

Il est donc essentiel d'établir un « profil » spécifique pour chaque département et secteur d'activité, couvrant à la fois le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Ces profils permettront de répartir les besoins annuels à un pas de temps horaire.

### Utilisation des données de température et d'ensoleillement

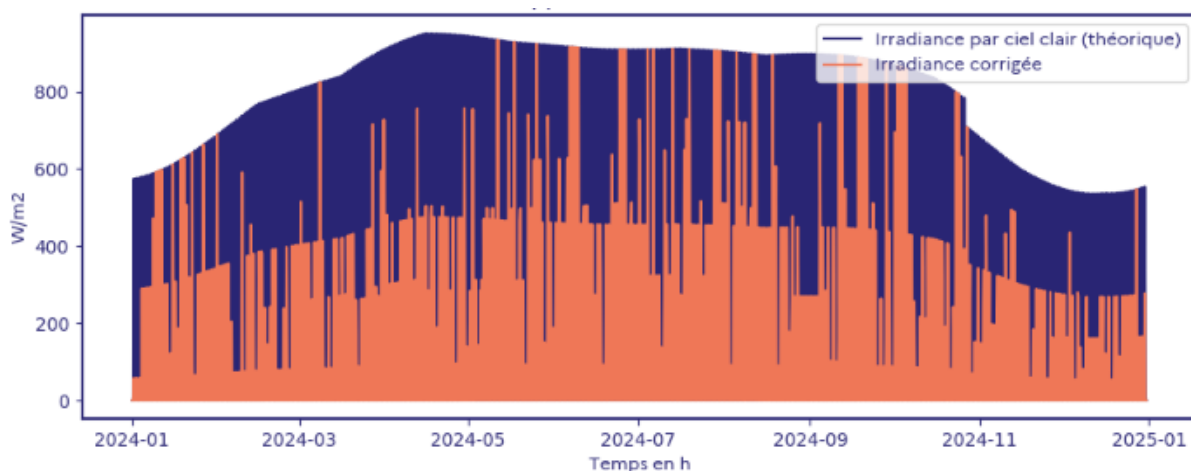
Pour établir ce profil il est nécessaire de collecter des données horaires concernant la température extérieure et l'ensoleillement.

Une valeur horaire de température est extraite par département avec le module **Meteostat**, un projet open source qui fournit un accès aux données météorologiques historiques, en agrégeant les données provenant de services météorologiques nationaux et internationaux (<https://meteostat.net/>). En France, ce module donne accès aux données historiques des stations Météo France à l'échelle départementale. Ces données sont représentées sous la forme d'un graphique à un pas de temps horaire (voir ci-dessous pour l'année 2024 et le département 62).



Le même module permet également de récupérer un indicateur relatif aux conditions climatiques globales.

Par ailleurs, un second module, appelé **pvlb** (<https://pvlb-python.readthedocs.io/en/stable/>), fournit des apports solaires théoriques par ciel clair à un pas de temps horaire. Ces apports sont ajustés en fonction des conditions climatiques [annexe 1], ce qui permet d'estimer avec précision les apports solaires effectifs (voir graphique page suivante).



## 1/ Estimation de la courbe de charge du réseau

L'irradiance globale théorique  $G$  est calculée par pvlib pour une inclinaison des panneaux de 45° et une orientation plein sud. Les irradiance directes, diffuses et réfléchies sont prises en compte :

$$G(h) = G_{directe}(h) + G_{diffuse}(h) + G_{réfléchie}(h)$$

### Profil horaire de la demande de chauffage

D'abord, une période de chauffage est définie. Elle correspond aux mois où la somme des Degrés Jour Unifiés (DJU) est supérieure à 100. Les périodes de chauffage sont variables selon les conditions météorologiques et les secteurs d'activité en raison des différentes températures de consigne [annexe 2].

Une fois la période de chauffage définie, la puissance horaire appelée par chaque bâtiment peut être simulée en fonction de la température extérieure et de la température de consigne. Basée sur la demande annuelle estimée par le Cerema ([voir méthodologie](#)), la formule utilisée est la suivante :

$$P_{chauffage}(h) = E_{annuelle\ chauffage} \times \frac{T_{consigne} - T_{ext}(h)}{\sum_h T_{consigne} - T_{ext}(h)} \text{ si } T_{ext}(h) < T_{consigne}$$

### Profil horaire de la demande d'eau chaude sanitaire

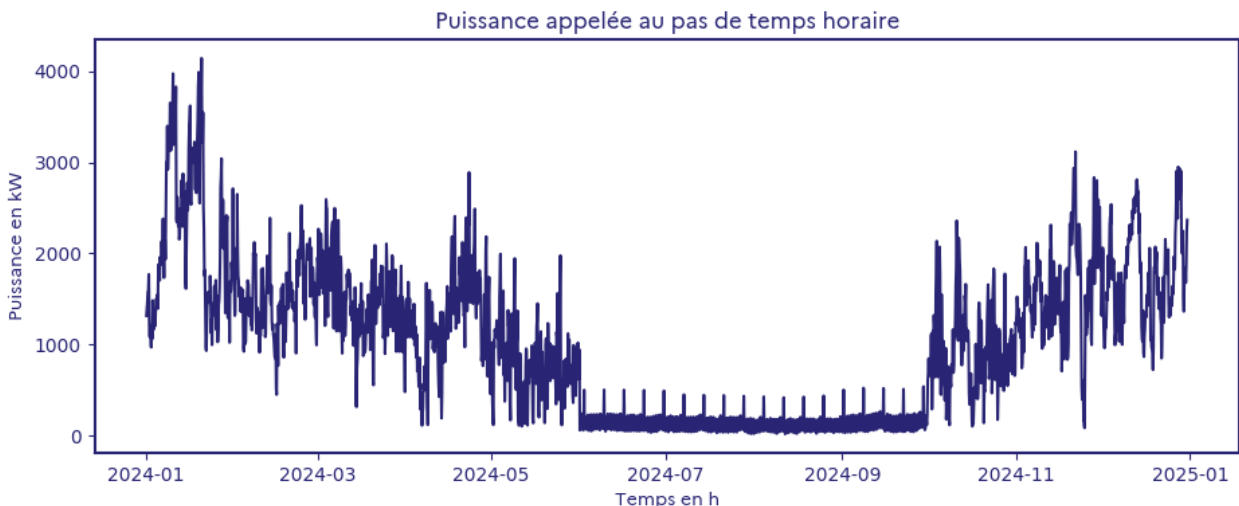
Il est supposé que la demande en eau chaude sanitaire est similaire chaque semaine d'un même mois. Toutefois, les répartitions horaires et journalières au sein d'une même semaine varient selon le secteur d'activité [annexe 3]. Un coefficient mensuel ajuste par ailleurs la consommation d'un mois à l'autre [annexe 4].

### Profil horaire de la demande de chaleur totale

Ainsi, la courbe de charge du réseau correspond, pour chaque heure de l'année, à la puissance de chauffage et d' ECS appelée par tous les bâtiments de la zone. Cette simulation permet non seulement de représenter la demande énergétique totale à chaque instant, mais également d'identifier le pic de puissance appelé, essentiel pour dimensionner les systèmes de production.

$$P_{totale}(h) = P_{chauffage}(h) + P_{ECS}(h)$$

$$P_{pic} = \max_h(P_{totale}(h))$$



## 2/ Dimensionnement des systèmes de production

Il est nécessaire d'évaluer la puissance réellement mobilisable pour chaque source d'énergie, en tenant compte du contexte spécifique de la zone d'opportunité.

L'outil considère les systèmes de production suivants :

- chaleur fatale industrielle
- chaleur fatale des UVE
- cloacothermie sur STEU
- chaleur fatale des datacenters
- thalassothermie
- géothermie sur nappe
- bois-énergie
- solaire thermique

Pour chacun de ces systèmes, des hypothèses sont établies afin de dimensionner et calculer la puissance horaire extractible, sans prise en compte systématique des régimes de températures réellement disponibles. Ces hypothèses sont détaillées ci-après.

### CHALEUR FATALE INDUSTRIELLE

Les gisements considérés sont ceux situés à proximité de la zone d'opportunité, dans un rayon d'1km à vol d'oiseau.

Lorsque plusieurs gisements sont présents, c'est le plus important qui est retenu.

Le gisement correspond à la moyenne des potentiels à haute température (supérieurs à 60°C).\*

Sans information sur les procédés industriels et les profils d'utilisation des équipements, le gisement annuel est réparti de façon homogène à chaque heure de l'année.

\*source : *Efficacity*



$$P_{productible}(h) = \frac{E_{gisement}}{N_{heures}}$$

### CHALEUR FATALE UVE

Les hypothèses sont identiques à celles établies pour la chaleur fatale industrielle.\*

\*source : *SVDU*

## 2/ Dimensionnement des systèmes de production

### CLOACOTHERMIE SUR STEU

La technologie utilisée est la récupération de chaleur en sortie de Station de Traitement des Eaux Usées (STEU) à l'aide d'une pompe à chaleur eau/eau.

Les stations considérées sont celles situées à proximité de la zone d'opportunité, dans un rayon d'1km à vol d'oiseau. Lorsque plusieurs STEU sont présentes, le plus fort potentiel est retenu.\*

\*source : DGALN



### Hypothèses établies pour le dimensionnement avec pompe à chaleur (PAC)

Il est supposé que la pompe à chaleur doit pouvoir couvrir **50% du pic de consommation énergétique, en tenant compte de la disponibilité du gisement.**

La puissance thermique prélevée au niveau de la source froide  $P_s$  est calculée de la manière suivante :

$$P_s(h) = Q_{steu}(h) \rho_{eau} C_{eau} \Delta T_{source\ froide}(h) \text{ avec } \Delta T = 5^{\circ}\text{C}$$

Les données relatives aux températures et aux débits des STEU sont disponibles à un pas de temps mensuel. Elles sont donc supposées constantes sur chaque jour du mois :

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Température (°C)	16.74	17.49	18.67	18.81	18.87	19.47	19.35	20.48	20.48	17.98	17.81	17.58
Débit (L/s)	43.38	46.17	44.65	40.43	31.66	28.12	29.01	31.72	28.24	31.4	30.41	27.88

Le coefficient de performance **COP** de fonctionnement de la PAC est calculé à partir du COP théorique de Carnot. La valeur du coefficient  $\eta_{PAC}$  a été discuté avec l'ADEME :

$$COP(h) = \eta_{PAC} COP_{carnot} = \eta_{PAC} \frac{T_{reseau}}{T_{reseau} - T_{source\ froide}(h)} \text{ avec } \eta_{PAC} = 0,4$$

Le COP permet de calculer la puissance en sortie de PAC (puissance calorifique utile  $P_U$ ) (à chaque instant en fonction de la puissance extraite de la source froide. Il sert aussi à déterminer la part d'énergie fournie par la STEU par rapport à celle obtenue via l'électricité consommée  $W$  (voir page suivante).

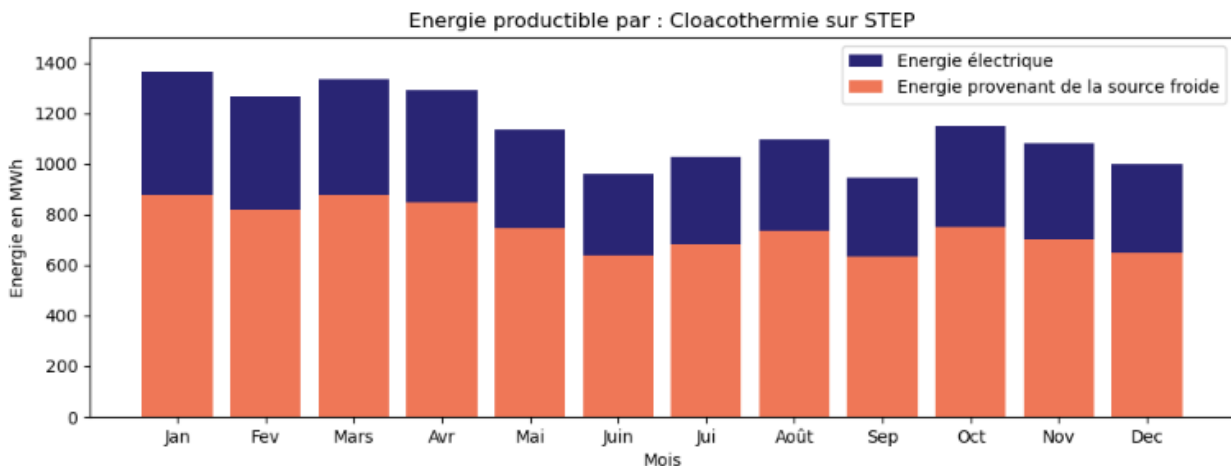
## 2/ Dimensionnement des systèmes de production

$$P_u(h) = P_s(h) + W$$

$$COP = \frac{P_u}{W}$$

$$P_u(h) = P_s(h) \left( \frac{COP(h)}{COP(h) - 1} \right)$$

La puissance de la pompe à chaleur est donc soit fixée à 50 % du pic de consommation si la STEU peut fournir cette puissance froide, soit limitée à la puissance utile maximale disponible  $P_u$ .



### GÉOTHERMIE SUR NAPPE

La technologie mise en œuvre relève de la géothermie de surface (< 200m), reposant sur la récupération de chaleur dans l'eau des nappes phréatiques grâce à un système de forage couplé à une PAC eau/eau.

**Les hypothèses de dimensionnement sont identiques à celles établies précédemment pour la cloacothermie.**

Les données concernant les températures et les débits des nappes proviennent des études régionales menées par le BRGM [Annexe 5].

Par ailleurs, le recours à la géothermie profonde (> 200m) est envisagé pour les réseaux dont la demande annuelle de chaleur est supérieure à 5 GWh.



## 2/ Dimensionnement des systèmes de production

### THALASSOTHERMIE

La technologie mise en œuvre est la récupération de chaleur sur l'eau de mer ou des fleuves grâce à un système de pompe couplé à une PAC eau/eau.

Les hypothèses de dimensionnement sont similaires à celles établies précédemment pour la cloacothermie. Les différences sont explicitées ci-dessous.

Les données concernant la température des sources sont reprises en [Annexe 6].



La puissance thermique prélevée au niveau de la source froide  $P_s$  est calculée de la manière suivante :

$$P_s(h) = Q_{thalasso}(h) \rho_{eau} C_{eau} \Delta T(h) \text{ avec } \Delta T = 3^\circ\text{C}$$

Le débit est contrôlable, à la différence des moyens de production étudiés précédemment. Il est estimé pour faire fonctionner la PAC à son plein potentiel et couvrir 50% du pic de consommation dans le cas d'utilisation le plus défavorable  $COP_{min}$  :

$$Q_{thalasso}max = \frac{P_smax}{\rho_{eau} C_{eau} \Delta T} \text{ avec } \Delta T = 3^\circ\text{C} \text{ et } P_smax = \frac{P_{pic}}{2} \left( 1 - \frac{1}{COP_{min}} \right)$$

### BOIS-ENERGIE

La centrale biomasse est dimensionnée pour couvrir **50% du pic de consommation énergétique du réseau**.

Il est supposé que la centrale cesse de fonctionner lorsque la puissance demandée est inférieure à 10% de sa puissance nominale.



## 2/ Dimensionnement des systèmes de production

### SOLAIRE THERMIQUE

La technologie mise en œuvre est le solaire thermique avec système de stockage.

Le système est dimensionné pour couvrir **80% de la demande estivale** (juillet et août). La surface nécessaire est estimée à partir de ce dimensionnement, par itérations successives.

Un système de stockage d'un volume **V** de 200L par m<sup>2</sup> de panneaux installés est également pris en compte.



### Hypothèses établies pour le dimensionnement avec stockage

La puissance produite par un panneau **P<sub>panneau</sub>** est calculée de la manière suivante :

$$P_{\text{panneau}}(h) = \eta_{\text{optique}} G(h) - P_{\text{perdue}}(h) \text{ avec } P_{\text{perdue}}(h) = a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2$$

$$\text{et } \Delta T = \frac{2T_{\text{reseau}} - \Delta T_{\text{reseau}}}{2} - T_{\text{ext}}$$

La puissance totale productible **P<sub>productible</sub>** du système est donc égale à :

$$P_{\text{productible}}(h) = S P_{\text{panneau}}(h)$$

La surface nécessaire **S** pour couvrir 80% de la demande estivale **P<sub>estivale</sub>** est calculée par le biais d'itérations successives avec un pas de **15m<sup>2</sup>** jusqu'à ce que l'équation suivante soit validée :

$$0,8 \sum_{h \in \text{juillet et août}} P_{\text{estivale}}(h) \leq \sum_{h \in \text{juillet et août}} P_{\text{productible}}(h)$$

Pour le stockage, la puissance extractible est modélisée de la façon suivante :

$$P_{\text{stockable}}^{\text{max}} = S_{\text{stockage}} \frac{V_{\text{eau}}}{1000} \rho_{\text{eau}} C_{\text{eau}} \Delta T_{\text{reseau}} \text{ et } P_{\text{stockée}}(h) = 0,99 P_{\text{stockée}}(h-1)$$

### 3/ Calcul du mix énergétique

L'objectif est de répartir la charge entre les différentes technologies disponibles, selon plusieurs scénarios. Chaque scénario sollicite un système de production principal, en fonction de sa disponibilité.

Si la demande est entièrement satisfaite par la puissance extractible du système, le mix simulé est monosource.

Dans le cas contraire, une centrale biomasse est ajoutée dans la simulation pour atteindre **80% d'EnR&R au sein du mix énergétique simulé**. L'appoint est assuré par le gaz.

#### Cas particuliers

Dans le cas d'un scénario sollicitant un système de production nécessitant une PAC, la distinction est faite au sein du mix énergétique entre l'énergie extraite de la source froide et l'énergie électrique consommée par la PAC.

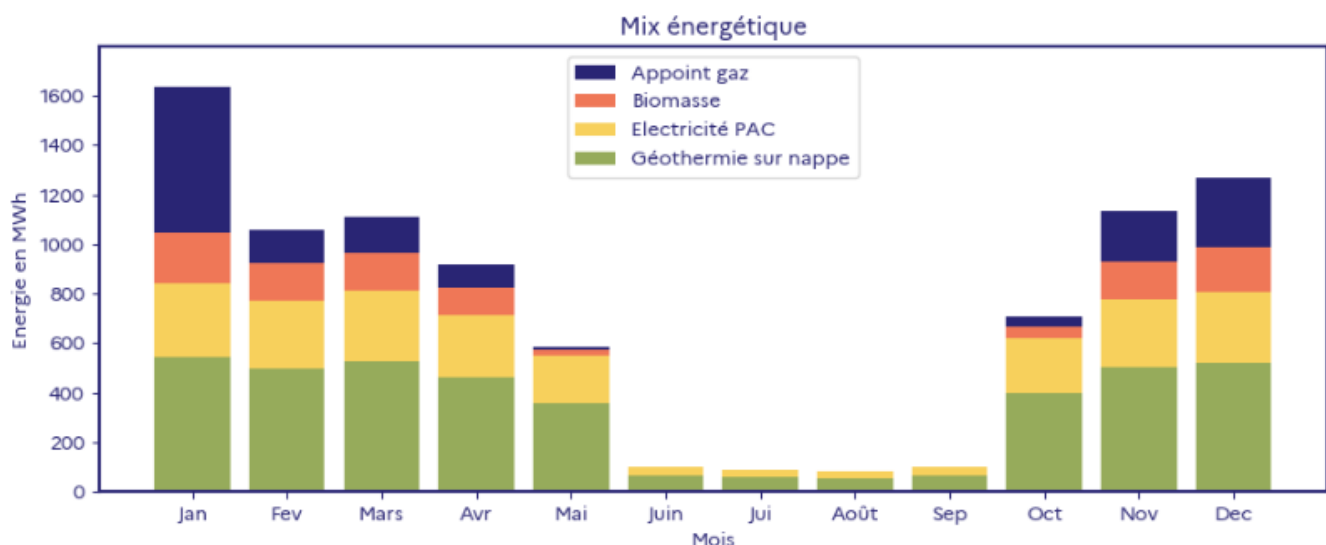
Dans le cas du solaire thermique, le stockage est bien pris en compte dans l'estimation de la puissance extractible mais n'apparaît pas dans le mix.

#### Remarque

Les scénarios sollicitant conjointement plusieurs systèmes de production principaux, comme par exemple la géothermie et le solaire thermique, pourront être modélisés dans une prochaine version du module.

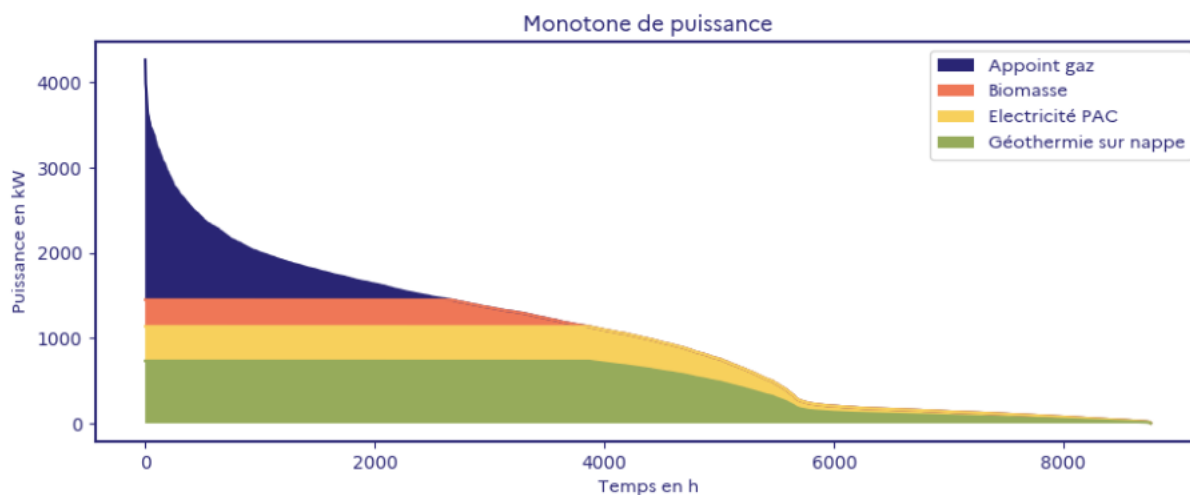
#### Affichage des résultats

Les résultats sont présentés sous la forme d'un histogramme mensuel illustrant la consommation du mix énergétique, d'une monotone de puissance, ainsi que d'un tableau détaillant le taux de couverture assuré par chaque moyen de production. La monotone met en évidence la capacité d'un système de production à satisfaire la demande en chaleur à chaque heure de l'année.



### 3/ Calcul du mix énergétique

Source énergétique	Taux de couverture (%)
Géothermie sur nappe	45.89
Electricité PAC	25.39
Biomasse	11.61
Appoint gaz	17.11



**ACCÈS AUX DONNÉES**  
[Portail EnRezo](#)

**CONTACT**  
[reseaux-chaleur@cerema.fr](mailto:reseaux-chaleur@cerema.fr)

**RÉDACTION ET MISE EN FORME**  
 Jules Montagne et Simon Bailly

**RELECTURE**  
 Luc Petitpain et Cindy Melfort



## ANNEXE 1 : indice de conditions climatiques

Code	Signification
0	Ciel clair
1	Partiellement nuageux
2	Nuageux
3	Couvert
4	Brouillard
5	Brouillard givrant
6	Brume
7	Fumée
8	Poussière / Sable
9	Sable soulevé par le vent
10	Tempête de sable
20	Pluie légère
21	Pluie modérée
22	Forte pluie

30	Neige légère
31	Neige modérée
32	Forte neige
40	Orage sans précipitations
41	Orage avec pluie
42	Orage avec neige ou grêle
60	Averses de pluie
61	Averses de neige
62	Averses de grêle
70	Bruine
71	Bruine verglaçante
80	Précipitations mixtes
81	Pluie et neige
82	Pluie et grêle
90	Non défini / Inconnu

Conditions climatiques	% énergie solaire reçue
1	100
2	80
3	50
4	30
7, 8, 9	10
Autres	30
[23, 25]	5

Sources :

**MeteoStat** – Documentation technique :  
<https://dev.meteostat.net/guide.html#our-services>

**PVlib** – Documentation officielle :  
<https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable>

## ANNEXE 2 : températures de consigne pour le chauffage

Secteur	Jour de la semaine	Température de consigne
RES – Résidentiel	Lundi - Dimanche	18°C
SAN – Santé	Lundi - Dimanche	22°C
BUR – Bureau	Lundi - Vendredi	18°C
	Samedi - Dimanche	8°C
CHR – Café Hôtel Restaurant	Lundi - Dimanche	18°C
COM – Commerce	Lundi - Dimanche	18°C
ENS – Enseignement	Lundi - Vendredi	18°C
	Samedi - Dimanche	8°C
HAB – Habitat collectif	Lundi - Dimanche	18°C
PIS – Piscine	Lundi - Dimanche	18°C
SCLE – Sport Culture Loisirs Équipements collectifs	Lundi - Dimanche	18°C

Source : [Légifrance](#) – Articles R241-26, R241-27 et arrêté du 25 juillet 1977 relatif à la limitation de la température de chauffage dans les locaux sanitaires et hospitaliers.

## ANNEXE 3 : profil journalier ECS

		Répartition par heure en %																							
Secteur	Jour	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
RES	L-V	1	0	0	0	1	1	5	9	6	5	6	6	6	4	4	3	3	4	6	8	10	6	4	2
	S	2	1	0	0	0	1	1	3	5	6	8	8	8	7	6	5	5	4	6	6	6	5	4	3
	D	2	1	0	0	0	0	1	1	2	4	6	7	8	8	7	6	6	6	7	8	8	6	4	2
SAN	L-V	0	0	0	0	2	5	8	9	8	7	6	6	6	6	7	8	7	6	5	3	1	0	0	0
	S-D	1	1	1	1	2	5	8	12	13	10	6	5	5	5	5	5	3	3	3	2	1	1	1	1
	D	1	1	1	1	2	5	8	12	15	10	6	5	5	5	5	5	3	3	2	2	1	1	1	0
BUR	L-V	0	0	0	0	0	0	0	1	3	13	13	13	13	13	13	13	3	1	0	0	0	0	0	0
	S-D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHR	L	1	1	1	0	1	1	5	13	11	6	6	4	2	3	2	2	2	3	5	6	6	7	7	5
	M-V	1	1	0	0	0	1	10	22	12	5	5	4	2	3	2	2	2	2	4	5	4	5	5	3
	S	3	1	0	0	0	1	2	5	13	14	8	5	5	4	3	3	2	2	3	5	6	4	5	6
	D	2	1	0	0	0	1	4	12	18	12	8	7	3	3	3	3	2	2	3	3	3	4	4	2
COM	L-D	0	0	1	4	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	4	1	0	0
ENS	L-J	0	0	0	0	0	1	14	6	8	7	3	3	4	6	10	2	2	1	1	4	4	24	0	0
	V	0	0	0	0	0	3	20	10	18	9	6	3	6	6	11	13	0	1	0	0	0	0	0	0
	S-D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HAB	L-V	1	0	0	0	1	1	5	9	6	5	6	6	6	4	4	3	3	4	6	8	10	6	4	2
	S	2	1	0	0	0	1	1	3	5	6	8	8	8	7	6	5	5	4	6	6	6	5	4	3
	D	2	1	0	0	0	0	1	1	2	4	6	7	8	8	7	6	6	6	7	8	8	6	4	2
PIS	L-S	0	0	0	0	0	0	0	1	4	7	10	7	6	7	10	13	12	12	11	0	0	0	0	0
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	7	20	29	27	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SCLE	L-D	0	0	0	0	0	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	0	0

## ANNEXE 4 : profil mensuel ECS

Secteur	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
RES	1,11	1,20	1,11	1,06	1,03	0,93	0,84	0,72	0,92	1,03	1,04	1,01
SAN	1,01	1,32	0,99	0,96	1,10	0,99	0,93	0,88	0,99	0,98	0,95	0,89
BUR	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	0,85	0,75	0,75	0,90	1,05	1,10	1,10
CHR	0,72	0,75	0,87	1,20	1,10	0,94	1,44	1,56	1,28	0,72	0,79	0,63
COM	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	0,85	0,75	0,75	0,90	1,05	1,10	1,10
ENS	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	0,85	0,75	0,75	0,90	1,05	1,10	1,10
HAB	1,11	1,20	1,11	1,06	1,03	0,93	0,84	0,72	0,92	1,03	1,04	1,01
PIS	1	1	1,27	1,19	1,13	0,88	0,98	1,04	0,77	1,05	0,96	0,74
SCLE	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	0,85	0,75	0,75	0,90	1,05	1,10	1,10

Source Annexes 3 et 4 :

**COSTIC, ADEME** – Les besoins d’eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif – Guide technique : <https://www.costic.com/ressources/documentation-et-outils/guide-sur-les-besoins-deau-chaudesanitaire-en-habitat-individuel-et-collectif>

**COSTIC, ADEME** – Vers une meilleure connaissance des besoins en eau chaude sanitaire dans le tertiaire : <https://www.costic.com/ressources/documentation-et-outils/vers-une-meilleure-connaissance-desbesoins-en-eau-chaude-sanitaire-en-tertiaire>

**SOCOL** – Ratios des besoins en eau chaude sanitaire pour le dimensionnement des installations en solaire thermique collectif – Fiche technique : [210209 Fiche-ratios-de-dimensionnement\\_21\\_VF.pdf](#)

## ANNEXE 5 : géothermie de surface – température et débit des nappes

Région	Potentiel	Très fort		Fort		Moyen		Faible		Très faible	
		Temp (°C)	Débit (m3/h)	Temp	Débit (m3/h)	Temp	Débit (m3/h)	Temp	Débit (m3/h)	Temp	Débit (m3/h)
Hauts-de-France		20	100	15	75	12	35	10	15	8	10
Île-de-France		20	80	15	60	12	30	10	15	8	10
Centre-Val-de-Loire		20	70	15	50	12	20	10	8	8	5
Bourgogne-Franche-Comté		20	70	15	75	12	20	10	15	8	10
Nouvelle-Aquitaine		20	90	15	75	12	35	10	15	8	10
Grand Est		20	80	15	60	12	30	10	15	8	10
Occitanie		20	70	15	50	12	20	10	8	8	5
Provence-Alpes-Côte d'Azur		20	70	15	50	12	20	10	8	8	5
Pays de la Loire		20	70	15	50	12	20	10	8	8	5
Bretagne		20	60	15	40	12	17	10	8	8	5
Normandie		20	80	15	60	12	30	10	15	8	10
Auvergne-Rhône-Alpes		20	70	15	50	12	20	10	8	8	5

Source : données extrapolées par le CEREMA à partir de [geothermies.fr](https://www.geothermies.fr)

## ANNEXE 6 : thalassothermie – température mer

Département	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Alpes-Maritimes	13	12	13	14	17	21	23	24	23	20	17	14
Bouches-du-Rhône	13	12	13	14	17	21	23	24	23	20	17	14
Calvados	8	7	8	9	12	15	17	18	17	15	12	9
Charente-Maritime	9	8	9	10	13	16	18	19	18	16	13	10
Côtes d'Armor	9	8	9	10	12	15	17	18	17	15	12	10
Finistère	9	8	9	10	12	15	17	18	17	15	12	10
Gard	12	11	12	13	16	20	22	23	22	19	16	13
Gironde	10	9	10	11	14	17	19	19	18	16	13	10
Hérault	13	12	13	14	17	21	23	24	23	20	17	14
Ille-et-Vilaine	8	7	8	9	11	14	16	17	16	14	11	9
Landes	10	9	10	11	14	17	19	20	19	17	14	11
Loire-Atlantique	9	8	9	10	13	16	18	18	17	15	12	10
Manche	7	6	7	8	11	14	16	17	16	14	11	8
Morbihan	9	8	9	10	12	15	17	18	17	15	12	10
Nord	6	5	6	7	10	13	15	16	15	13	10	7
Pas-de-Calais	6	5	6	7	10	13	15	16	15	13	10	7
Pyrénées-Atlantiques	11	10	11	12	15	18	20	21	20	18	15	12
Pyrénées-Orientales	13	12	13	14	17	21	23	24	23	20	17	14
Seine-Maritime	7	6	7	8	11	14	16	17	16	14	11	8
Somme	7	6	7	8	11	14	16	17	16	14	11	8
Var	13	12	13	14	17	21	23	24	23	20	17	14
Vendée	9	8	9	10	13	16	18	19	18	16	13	10
Corse-du-Sud	14	13	14	15	18	22	24	25	24	21	18	15
Haute-Corse	14	13	14	15	18	22	24	25	24	21	18	15

Source : <https://www.seatemperature.org/europe/france/all>

## Notations

$a_1$  : coefficient linéaire de pertes thermiques en  $W/m^2K$

$a_2$  : coefficient quadratique de pertes thermiques en  $W/m^2K^2$

$C_{eau}$  : capacité calorifique massique de l'eau liquide en  $J/kgK$

$COP$  : coefficient de performance de la pompe à chaleur sans unité

$COP_{carnot}$  : coefficient de performance théorique de la pompe à chaleur sans unité

$E_{annuelle\ chauffage}$  : besoin annuel estimé en chauffage du groupe de bâtiments en  $Wh$

$E_{gisement}$  : gisement annuel disponible en  $Wh$

$G$  : irradiance totale en  $W/m^2$

$P_{chauffage}$  : puissance nécessaire pour répondre à la demande de chauffage en  $W$

$P_{estivale}$  : puissance nécessaire pour répondre à la demande de chaleur estivale en  $W$

$P_{ECS}$  : puissance nécessaire pour répondre à la demande d'ECS en  $W$

$P_{panneau}$  : puissance productible par un panneau solaire en  $W$

$P_{perdue}$  : puissance perdue via les pertes thermiques en  $W$

$P_{stockable\ max}$  : puissance maximale stockable en une heure en  $W$

$P_{totale}$  : puissance nécessaire pour répondre à la demande de chaleur en  $W$

$P_{pic}$  : puissance maximale appelée sur une heure de l'année en  $W$

$P_{productible}$  : puissance productible par un moyen de production en  $W$

$P_s$  : puissance extraite de la source froide en  $W$  (dimensionnement PAC)

$P_u$  : puissance utile en sortie de pompe à chaleur en  $W$  (dimensionnement PAC)

$Q_{steu}$  : débit d'eau en sortie de STEU en  $L/s$

$Q_{thalasso}$  : débit d'eau extrait de la mer en  $L/s$

$S_{stockage}$  : surface de la cuve de stockage en  $m^2$

$S$  : surface totale de panneaux pour la centrale de solaire thermique en  $m^2$

$T_{consigne}$  : température de consigne de chauffage du secteur d'activité en  $K$

$T_{ext}$  : température moyenne de l'air extérieur en  $K$

$T_{réseau}$  : température de consigne du réseau de chaleur en  $K$

$T_{source\ froide}$  : température d'entrée de la source froide en  $K$

$V_{eau}$  : volume d'eau stockable par le système de stockage en  $m^3$

$W$  : puissance électrique apportée en  $W$  (dimensionnement PAC)

$\rho_{eau}$  : masse volumique de l'eau en  $kg/L$

$\eta_{PAC}$  : rendement entre le COP théorique et le COP de Carnot sans unité

$\eta_{optique}$  : rendement optique pour le solaire thermique sans unité

$\Delta T_{source\ froide}$  : différence de température entre l'eau prélevée dans la source froide et l'eau rejetée en  $K$

$\Delta T_{réseau}$  : différence de température entre la température de consigne du réseau de chaleur et la température de retour en  $K$