

# Plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques : Manuel Utilisateur

Pierre-Etienne PRIVAT, Théophile GUILLON, Charles MARAGNA

Version 1 du 1<sup>er</sup> avril 2022.

## Sommaire

1. Echangeurs pour la maison individuelle.....	4
1.1. Caracteristiques de la maison individuelle.....	4
<i>Commune</i> .....	4
<i>Altitude</i> :.....	4
<i>Comportement thermique de la maison</i> .....	5
1.1.1. <i>Le calcul déperditif simplifié</i> :.....	5
1.1.2. <i>Les besoins horaires précalculés</i> .....	7
1.2. Choix de la pac et caracteristiques de l'échangeur geothermique .....	7
<i>Choix de l'émetteur de chauffage/rafraichissement</i> : .....	8
<i>Choix de la PAC</i> .....	8
<i>Puissance d'appoint pour la fonction chauffage</i> .....	9
<i>Le choix de l'échangeur géothermique</i> .....	9
<i>Type de sol rencontré à la profondeur d'implantation de l'échangeur géothermique choisi</i> .....	10
1.3. Resultats .....	10
2. Un bâtiment (Champ de sondes) .....	12
2.1. Preamble.....	12
2.2. Importer un projet.....	13
2.3. Caracteristiques du batiment.....	13
<i>Comportement thermique du bâtiment</i> .....	13
2.3.1. <i>Besoins horaire fournis par l'utilisateur</i> .....	13
2.3.2. <i>Bibliothèque de besoins horaires</i> .....	14
<i>Localisation</i> .....	16
<i>Usage</i> .....	16
<i>Données clés</i> .....	16
<i>Mise à l'échelle spécifique au projet</i> .....	16
2.4. Systeme de surface.....	16
<i>PAC</i> .....	17
<i>Appoint</i> .....	17
<i>Système de chauffage et de rafraichissement</i> .....	17
2.5. Champ de sondes .....	18

2.5.1.	<i>Résistance thermique du forage</i> .....	18
2.5.2.	<i>Profondeur</i> .....	19
2.5.3.	<i>Implantation des sondes</i> .....	19
2.5.4.	<i>Type d'implantation</i> .....	20
a)	<i>Charger une implantation</i> .....	20
b)	<i>Sélectionner un type d'implantation prédéfini</i> .....	20
2.5.5.	<i>Terrain</i> .....	21
c)	<i>Température initiale</i> .....	21
d)	<i>Température initiale moyenne du terrain</i> .....	21
e)	<i>Propriétés thermiques</i> .....	22
2.6.	<i>Resultats</i> .....	23

## Liste des figures

Figure 1 :	Que voulez-vous dimensionner .....	4
Figure 2 :	Caractéristiques de la maison individuelle .....	4
Figure 3:	Calcul déperditif simplifié .....	5
Figure 4 :	Modification des besoins de chauffage pris en charge par la PAC par écrêtage à hauteur de la valeur maximale de chauffage ôtée de la puissance de l'appoint. ....	6
Figure 5 :	Stratégie de production de l'Eau Chaude Sanitaire pour la maison individuelle. ....	6
Figure 6 :	Besoins horaires précalculés.....	7
Figure 7 :	Choix de la PAC et caractéristiques de l'échangeur géothermique .....	7
Figure 8 :	Lois d'eau : température de départ du circuit de chauffage en fonction de la température extérieure pour les trois types d'émetteurs considérés. ....	8
Figure 9 :	Caractéristiques de ma PAC .....	8
Figure 10 :	Résultats maison individuelle.....	10
Figure 11 :	Dimensionner un bâtiment.....	13
Figure 12 :	Besoins horaire fournis par l'utilisateur .....	14
Figure 13 :	Bibliothèque de besoins horaires.....	15
Figure 14 :	DJU <sub>18</sub> en chauffage et rafraîchissement pour les climats proposés dans l'application (« GRETA ») et quelques villes en France (RT2012 et CEGIBAT). ....	16
Figure 15 :	Système de surface.....	17
Figure 16 :	Lois d'eau : température de départ du circuit de chauffage en fonction de la température extérieure pour les trois types d'émetteurs considérés. ....	18
Figure 17 :	Champ de sondes .....	18
Figure 18 :	Distribution statistique de résistance $R_f$ par classe de diamètre pour 68 forages d'environ 100 mètres de profondeur (Maragna et al., 2021). ....	19
Figure 19 :	Charger une implantation .....	19
Figure 20 :	Sélectionner un type d'implantation prédéfini.....	20
Figure 21 :	Terrain.....	21

Figure 22 : Propriétés thermiques inconnues .....	22
Figure 23 : Distribution de la conductivité mesurée par TRT sur 105 forages dont plus de 80% de la hauteur traverse une seule lithologie (Maragna et al., 2021). Le nombre de TRT par lithologie est affiché à droite. ....	23
Figure 24 : Résultats bâtiment.....	24
Figure 25 : Contenu du fichier zip.....	26

Que voulez-vous dimensionner ? L'outil de dimensionnement permet de dimensionner des échangeurs géothermiques pour des maisons individuelles mais également des champs de sondes géothermiques destinés aux bâtiments collectifs ou tertiaires.

## Dimensionner une PAC

Que voulez-vous dimensionner ?

Choisir

Choisir

Une maison individuelle

Un bâtiment

Figure 1 : Que voulez-vous dimensionner

Choisir l'objet du dimensionnement : **Echangeurs pour la** maison individuelle ou (Champ de sondes)

# 1. Echangeurs pour la maison individuelle

## 1.1. Caractéristiques de la maison individuelle

Caractéristiques de la maison individuelle

[1] Renseigner la commune

Commune  
ORLEANS (45000)

[2] Sélectionner l'altitude du site

Climat  
H1b

Altitude  
plus de 800 m  
Sélectionner une altitude  
moins de 400 m  
de 400 à 800 m  
plus de 800 m

Altitude de référence : 100 mètres.

Comportement  
Sélectionner un mode d'obtention

Comportement thermique de la maison  
Sélectionner un mode d'obtention  
Sélectionner un mode d'obtention  
Calcul déperditif simplifié  
Besoins horaires précalculés

[3] Sélectionner la méthode de saisie des données

Puissance nécessaire

Calculer

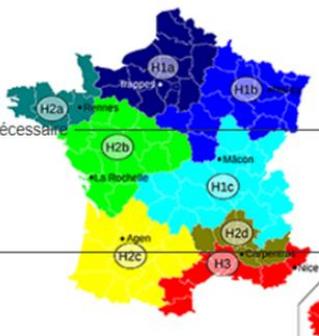


Figure 2 : Caractéristiques de la maison individuelle

**Commune** : renseigner la commune d'implantation du bâtiment [1] de la Figure 2, une fois la commune renseignée, l'outil sélectionne automatiquement la zone climatique correspondante définie dans la RT2012.

**Altitude** : il est possible de modifier l'altitude de la commune afin de tenir compte des communes à forts dénivelés (régions montagneuses) [2] de la Figure 2. La température de l'air est alors mise à jour.

**Comportement thermique de la maison :** dans le menu déroulant deux sélections sont possibles ([3] Figure 2), **le calcul déperditif simplifié** qui permet d'estimer facilement la puissance nécessaire **et les besoins horaires précalculés** qui permettent à l'utilisateur d'ajouter un fichier texte ou Excel pour renseigner les besoins énergétiques de la maison.

### 1.1.1. Le calcul déperditif simplifié :

Caractéristiques de la maison individuelle

Commune  
ORLEANS (45000)

Climat H1b Altitude moins de 400 m Altitude de référence : 100 mètres.

Comportement thermique de la maison  
Calcul déperditif simplifié

Coefficient de déperdition volumique G  
1 [W.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>]

Surface habitable  
120 [m<sup>2</sup>]

Hauteur sous plafond  
2.5 [m]

Nombre d'occupants  
5

[1] Variables à renseigner

[2] Case à cocher si la PAC assure également la production d'ECS

[3] Case à cocher pour prendre en compte le rafraîchissement direct

[4] Permet de calculer la puissance maximale nécessaire pour répondre aux besoins de chauffage de la maison

Puissance nécessaire  
Calculer  
Puissance maximale nécessaire au chauffage de la maison individuelle : 6.50 kW

Figure 3: Calcul déperditif simplifié

Dans la Figure 3 partie [1], renseigner le coefficient de déperdition volumique en  $W.m^{-3}.K^{-1}$ , la surface habitable en  $m^2$  la hauteur sous plafond et le nombre d'occupants de votre maison individuelle. Penser à cocher la case [2] si votre PAC assure également la production d'eau chaude sanitaire, de même si vous voulez prendre en compte le rafraîchissement direct [3]. Finalement cliquer sur **calculer** [4] pour obtenir la puissance maximale nécessaire pour répondre aux besoins de chauffage de la maison.

Le chauffage fonctionne du 16 octobre au 15 mai. La consigne en chauffage est variable, sur la base d'un fonctionnement avec réduit de nuit : de 6 h à 22 h, la température d'émission est de 19 °C, de 22 h à 6 h elle est de 16°C. La consigne en rafraîchissement est fixée à 26°C. Les apports internes sont constants au cours de l'année : Chaque occupant apporte 100 W ; les usages internes sont estimés à 6 W/m<sup>2</sup>.

L'appoint fonctionne en priorité par rapport au chaud actif de la géothermie. L'appoint tourne donc au maximum pour couvrir le besoin en chauffage, et le chaud actif ne se déclenche que pour couvrir l'éventuel manque à gagner entre le besoin et ce que peut fournir l'appoint (cf. Figure 4).

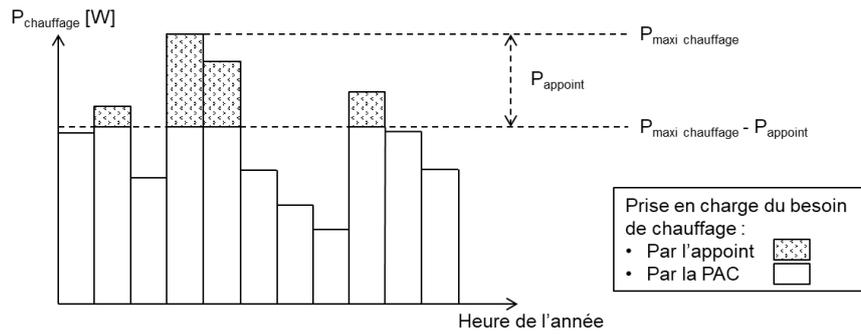


Figure 4 : Modification des besoins de chauffage pris en charge par la PAC par écrêtage à hauteur de la valeur maximale de chauffage ôtée de la puissance de l'appoint.

L'énergie nécessaire à la production d'ECS est estimée à 2,5 kWh/jour/occupant. La température de production de l'ECS est constante à 50°C. La stratégie de production d'ECS consiste à produire de l'ECS à partir de 22 h et à reporter les besoins de chauffage sur les heures restantes pendant la période de réduit de nuit (cf. Figure 5).

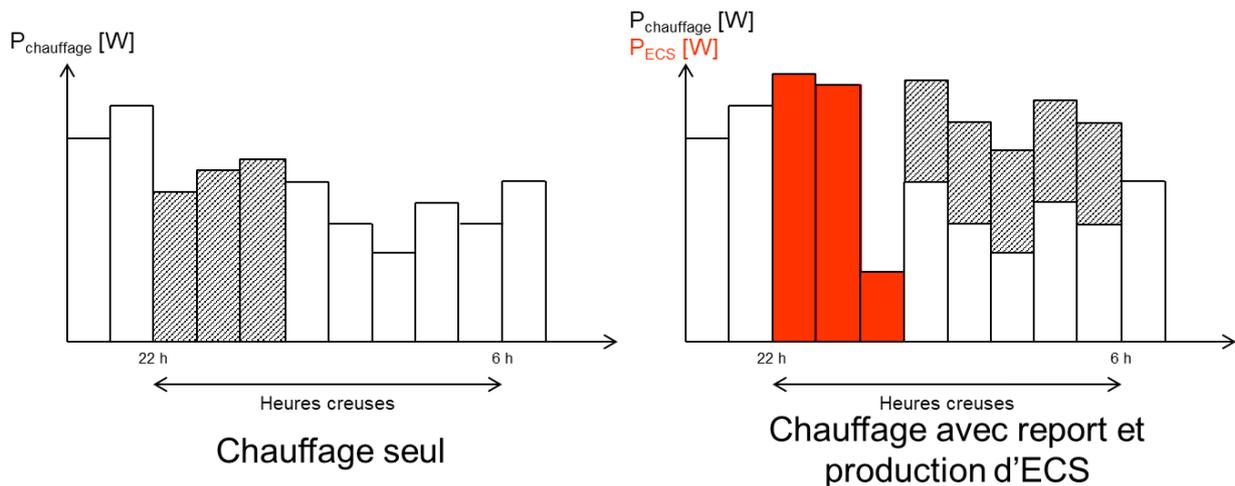


Figure 5 : Stratégie de production de l'Eau Chaude Sanitaire pour la maison individuelle.

### 1.1.2. Les besoins horaires précalculés

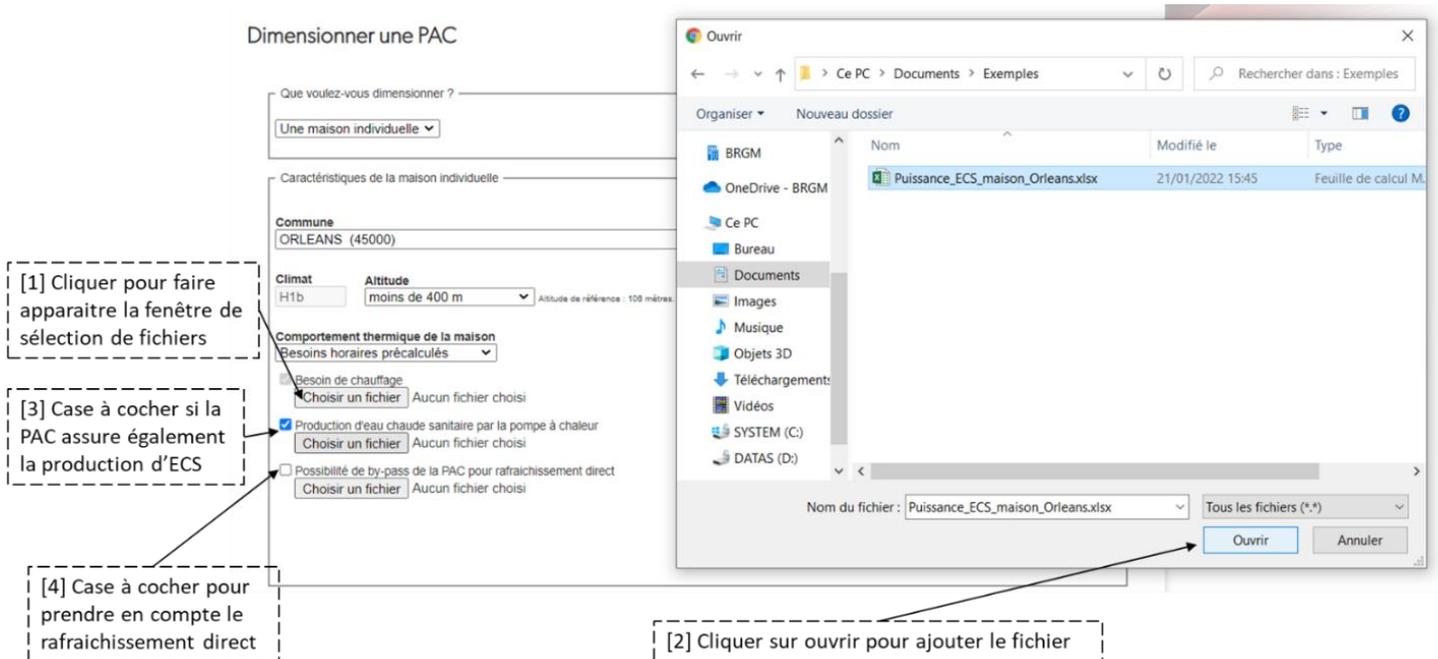


Figure 6 : Besoins horaires précalculés

Dans le cas où vous disposez déjà des besoins énergétiques de votre maison vous pouvez les ajouter au projet en cliquant sur **choisir un fichier** ([1] Figure 6), une fenêtre de sélection apparait vous permettant de sélectionner votre fichier. Une fois votre fichier sélectionné cliquez sur **ouvrir** [2] pour l'ajouter au projet. Attention les fichiers acceptés sont de deux types, les fichiers Excel constitués de 8760 lignes avec une puissance horaire en Watt par ligne et les fichiers textes encodés en ASCII ou UTF8 et constitués de 8760 lignes avec une puissance horaire en Watt par ligne.

Pensez également à cocher les cases de production d'ECS par la PAC [3] et rafraîchissement direct [4] si ces aspects sont cohérents avec votre projet.

### 1.2. Choix de la pac et caractéristiques de l'échangeur géothermique

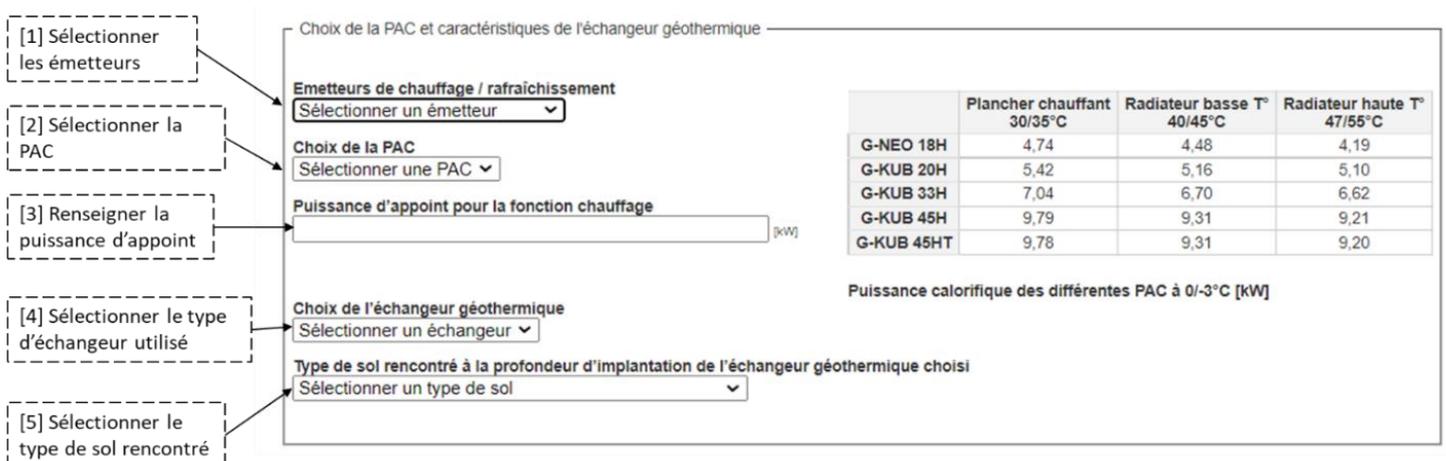


Figure 7 : Choix de la PAC et caractéristiques de l'échangeur géothermique

**Choix de l'émetteur de chauffage/rafraîchissement :** commencer par sélectionner le type d'émetteur utilisé pour le chauffage et le rafraîchissement ([1] Figure 7), 3 types d'émetteurs, associés à 3 lois d'eau sont accessibles; le plancher chauffant, le radiateur basse température et le radiateur haute température, chacun ayant son propre régime d'eau (cf. Figure 8). Si vous sélectionnez le **plancher chauffant**, renseignez son **coefficient d'échange thermique** en  $W.K^{-1}.m^{-2}$  ainsi que la **température minimum du fluide à l'entrée du bâtiment** ([1.1] Figure 9).

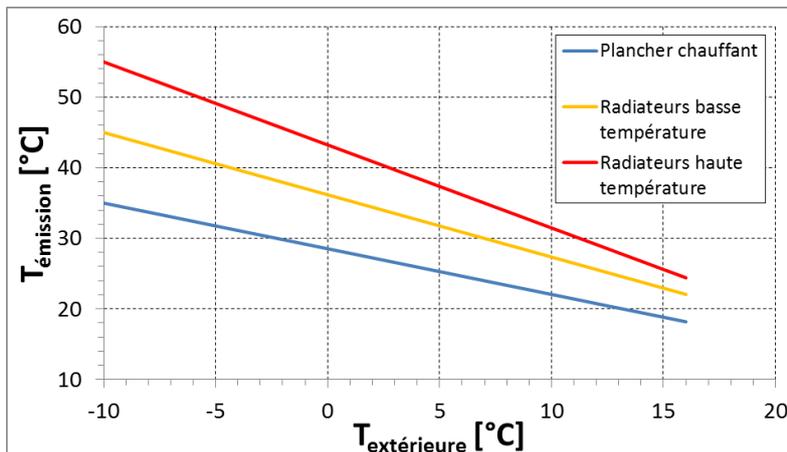


Figure 8 : Lois d'eau : température de départ du circuit de chauffage en fonction de la température extérieure pour les trois types d'émetteurs considérés.

[2.1] Sélectionner ma PAC

[2.2] Variables à compléter

[1.1] Variables propres au plancher chauffant

Choix de la PAC et caractéristiques de l'échangeur géothermique

Emetteurs de chauffage / rafraîchissement

Choix de la PAC

Caractéristiques de ma PAC

Débit nominal échangeur géothermique  
 [m<sup>3</sup>/h]

Puissance de veille  
 [W]

Puissance calorifique  
 [kW]

Puissance absorbée compresseur  
 [kW]

Puissance d'appoint pour la fonction chauffage  
 [kW]

Coefficient d'échange thermique du plancher (mode fluide/bâtiment)  
 [W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>]

Température minimum du fluide à l'entrée du bâtiment  
 [°C]

	Plancher chauffant 30/35°C	Radiateur basse T° 40/45°C	Radiateur haute T° 47/55°C
G-NEO 18H	4,74	4,48	4,19
G-KUB 20H	5,42	5,16	5,10
G-KUB 33H	7,04	6,70	6,62
G-KUB 45H	9,79	9,31	9,21
G-KUB 45HT	9,78	9,31	9,20

Puissance calorifique des différentes PAC à 0/-3°C [kW]

Figure 9 : Caractéristiques de ma PAC

**Choix de la PAC :** en fonction des caractéristiques de votre installation vous pouvez sélectionner une des 5 pompes à chaleur présentes sur l'outil ([2] Figure 7), la puissance de ces PAC en fonction du type d'émetteur est présentée dans le tableau en haut à droite (Figure 9). Il est également possible de sélectionner « ma PAC » [2.1] et de renseigner vous-même les caractéristiques de la pompe à chaleur ([2.2], Figure 9). L'application fait appel à des

corrélations sur les puissances thermiques et électriques de la PAC en fonction des températures entrée évaporateur et sortie condenseur.

**Puissance d'appoint pour la fonction chauffage** : renseigner la puissance d'appoint pour la fonction chauffage ([3] Figure 7), l'appoint fonctionne en priorité par rapport au chaud actif de la géothermie. L'appoint tourne donc au maximum pour couvrir le besoin en chauffage, et le chaud actif ne se déclenche que pour couvrir l'éventuel manque à gagner entre le besoin et ce que peut fournir l'appoint.

**Le choix de l'échangeur géothermique** : sélectionner le type d'échangeur géothermique adapté à votre projet parmi, les corbeilles géothermiques, les échangeurs horizontaux, les échangeurs verticaux et les échangeurs micro-verticaux ([4] Figure 7). Le mur géothermique est également disponible dans la sélection mais il est, pour le moment, toujours en développement. Tous les échangeurs sont traités de manière similaire : La température du sol non perturbée  $T_0$  est calculée sur la profondeur couverte par l'échangeur géothermique. L'échange entre le fluide et le sol en contact avec l'échangeur (contact sol – tuyau ou sol – coulis suivant les cas) est modélisé par une résistance thermique d'échange  $R_b$ . L'échange entre l'échangeur géothermique et le sol est décrit par une fonction analytique (« fonction G ») traduisant l'évolution de la température en paroi d'échangeur quand on passe d'une puissance nulle à une puissance constante.

Les principales caractéristiques des échangeurs sont exposées ci-dessous :

- **Les sondes géothermiques verticales** :
  - o Diamètre du forage = 160 mm
  - o  $R_b = 0,06 \text{ K.m/W}$  (sonde en double U)
  - o  $T_0$  évaluée en moyenne sur une profondeur de 100 m
  - o Fonction G : source linéique infinie
- **Les échangeurs géothermiques horizontaux** :
  - o Profondeur de pose = 1,0 m
  - o Pas d'espacement du serpentín = 0,5 m
  - o Tube DN 20 SDR 11 en PE100 (conductivité thermique = 0,45 W/(m.K))
  - o Écoulement laminaire du fluide ( $Nu = 4,36$ )
  - o  $T_0$  évaluée à la profondeur de pose
  - o Fonction G : source plane infinie à la profondeur de pose avec condition isotherme à la surface du sol
- **Les corbeilles géothermiques** :
  - o Profondeur de pose (bas de la corbeille) = 3,7 m
  - o Hauteur de la corbeille = 2,7 m
  - o Diamètre de la corbeille = 1,14 m
  - o Pas d'espacement des spires = 0,13 m
  - o Tube DN 25 SDR 11 en PE100 (conductivité thermique = 0,45 W/(m.K))
  - o  $Nu = 8,72$  (Double du régime laminaire grâce au rainurage du tube)
  - o  $T_0$  évaluée en moyenne couverte par la corbeille (de 1 à 3,7 m)
  - o Fonction G : source cylindrique creuse
- **Les micro-sondes géothermiques verticales** :
  - o Diamètre du forage = 130 mm
  - o Profondeur de pose (pied de sonde) = 10 m
  - o Hauteur unitaire de la micro-sonde = 9 m
  - o  $R_b = 0,10 \text{ m.K/W}$  (sonde en simple U)
  - o  $T_0$  évaluée en moyenne sur la profondeur d'implantation (de 1 à 10 m)
  - o Fonction G : source linéique finie depuis la hauteur de tête de sonde

**Type de sol rencontré à la profondeur d'implantation de l'échangeur géothermique choisi :** dans le menu déroulant choisissez le type de sol rencontré à la profondeur d'implantation de l'échangeur géothermique ([5] Figure 7). Dans cet exemple le Calcaire est sélectionné.

### 1.3. Resultats

Pour afficher les résultats de la simulation cliquer sur **calculer** ([1] Figure 10), cela peut prendre quelques instants. Le système est simulé au pas de temps horaire sur 5 ans pour la sonde géothermique verticale et sur 2 ans pour les trois autres types d'échangeur considérés.

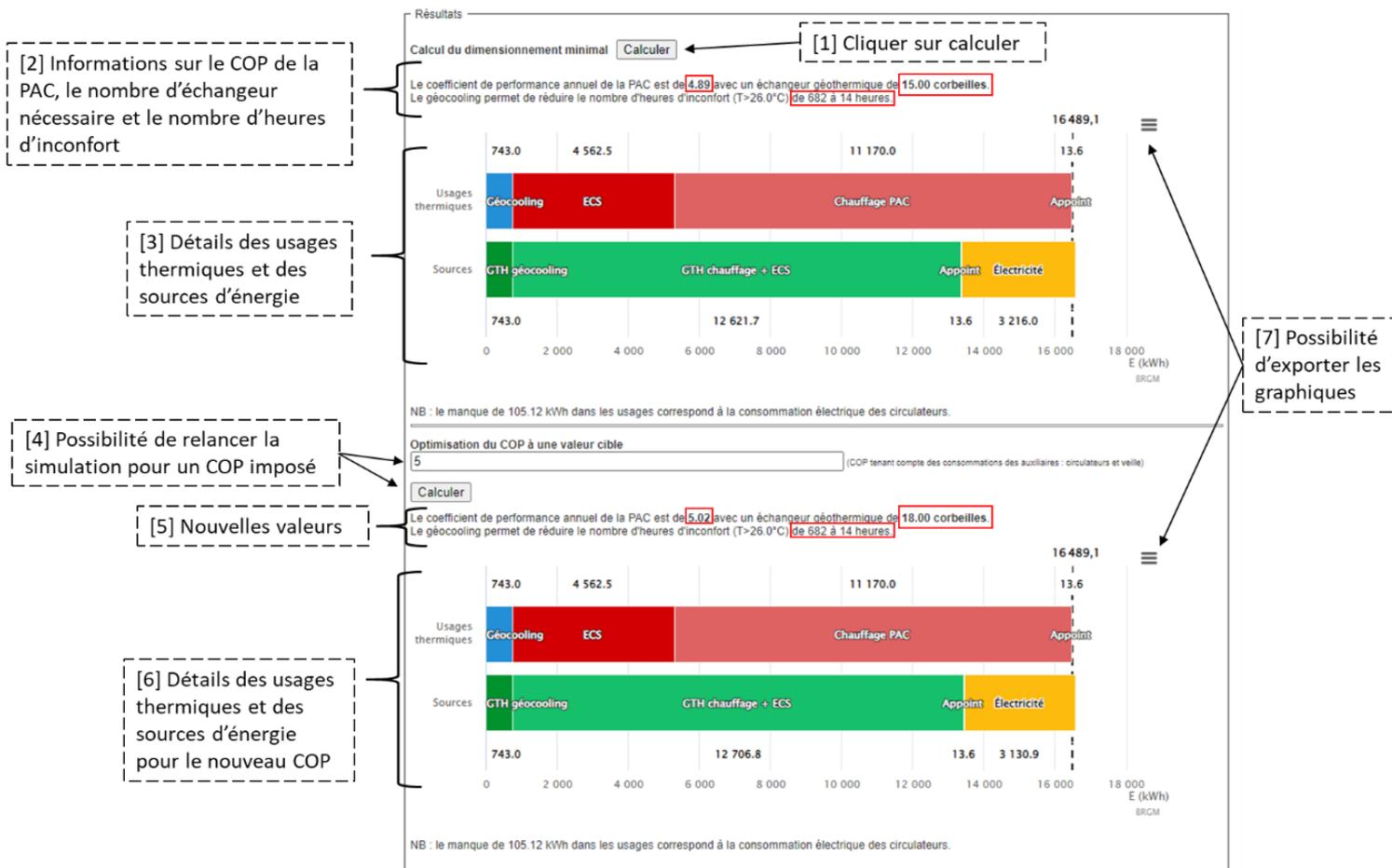


Figure 10 : Résultats maison individuelle

Dans la première partie [2] de la Figure 10 le coefficient de performance annuel de la PAC associé au nombre d'échangeur géothermique est renseigné. Si vous avez coché la case autorisant le by-pass de la PAC pour le rafraîchissement direct, le nombre d'heure d'inconfort avant et après géocooling est affiché. Le détail des consommations annuelles en kWh pour les usages thermiques ainsi que les sources d'énergie permettant de répondre à ces usages est présenté dans la partie [3] de la Figure 10.

Dans la section suivante il est possible d'optimiser le COP de la PAC en ajustant le nombre d'émetteurs géothermiques. Commencer par renseigner la valeur de COP à atteindre [4], puis cliquer sur **calculer**. Un nouveau résumé de la simulation apparaît avec les valeurs actualisées sur le nouveau COP [5] de même pour les sources d'énergie [6].

## Manuel utilisateur

Les deux graphiques sont téléchargeables sous différents formats, pour ouvrir le menu cliquer sur le bouton [7] de la Figure 10.

## 2. Un bâtiment (Champ de sondes)

### 2.1. Preambule

La simulation du champ de sondes repose sur une Simulation Thermique Dynamique (STD) au pas de temps horaire du système constitué du bâtiment, de la Pompe à Chaleur et du champ de sondes. A la différence des échangeurs pour la maison individuelle, la STD est menée sur 25 années consécutives afin de permettre à l'utilisateur de s'assurer de la pérennité de l'installation, i.e. qu'on évite une dérive de la température du champ de sondes au cours de l'exploitation.

Le champ de sondes est modélisé au moyen de méthodes analytiques appelées « fonctions G ». Chaque forage est assimilé à une ligne de longueur finie émettant de la chaleur dans un milieu homogène sans écoulement souterrain (cf. (Maragna et al., 2021) pour une description détaillée du moteur de calcul). Pour une SGV, la température du fluide dans le forage est de la forme :

$$T_{fl}(t) = T_0 + \frac{p}{\lambda_m} G(t) \quad (1)$$

Avec :

- $T_0$  : la température initiale du terrain (°C)
- $p$  : la puissance linéaire échangée par mètre de forage ( $W.m^{-1}$ )
- $\lambda_m$  : conductivité thermique du terrain ( $W.K^{-1}.m^{-1}$ )
- $R_f$  : résistance du forage ( $K.m.W^{-1}$ )

La fonction  $G$  traduit l'évolution de la température moyenne du fluide suite à un échelon de puissance. La fonction  $G$  est caractéristique du champ de sondes et fait intervenir trois termes correspondant à trois échelles de temps :

$$G(t^*) = \underbrace{\frac{\lambda_m R_f}{\lambda_m R_f}}_{\substack{\text{transfert} \\ \text{immédiat} \\ \text{dans un forage}}} + \underbrace{\frac{G_0(t^*)}{G_0(t^*)}}_{\substack{\text{transfert à} \\ \text{proximité} \\ \text{d'un forage}}} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N G_{i \rightarrow j}(t^*)}_{\text{interactions entre les } N \text{ forages}} \quad (2)$$

La méthode de calcul de la température de liquide caloporteur a été validée par comparaison avec les logiciels EED, le module DST (Type 557) de TRNSYS et un modèle aux éléments finis, en supposant un milieu homogène sans écoulement souterrain (Maragna et al., 2021). L'outil Cartodim ne permet pas d'étudier l'influence de l'écoulement souterrain sur la température du sous-sol, il faudra recourir à des outils de modélisation hydrogéologique pour ce faire.

L'outil de dimensionnement de champs de sondes a vocation à être utilisé dans un processus itératif. Avec les différents paramètres décrits dans les parties suivantes il vous sera possible de tester différentes configurations afin d'optimiser manuellement le champ de sondes en fonction des contraintes du projet. Un critère de dimensionnement peut consister à respecter un des critères de régime simplifié du Code Minier dit de « Géothermie de Minime Importance » (GMI), à savoir que la température du fluide caloporteur en entrée d'échangeur géothermique doit toujours être comprise entre -3 °C et +40 °C (Journal Officiel de la République Française, n.d.).

## 2.2. Importer un projet

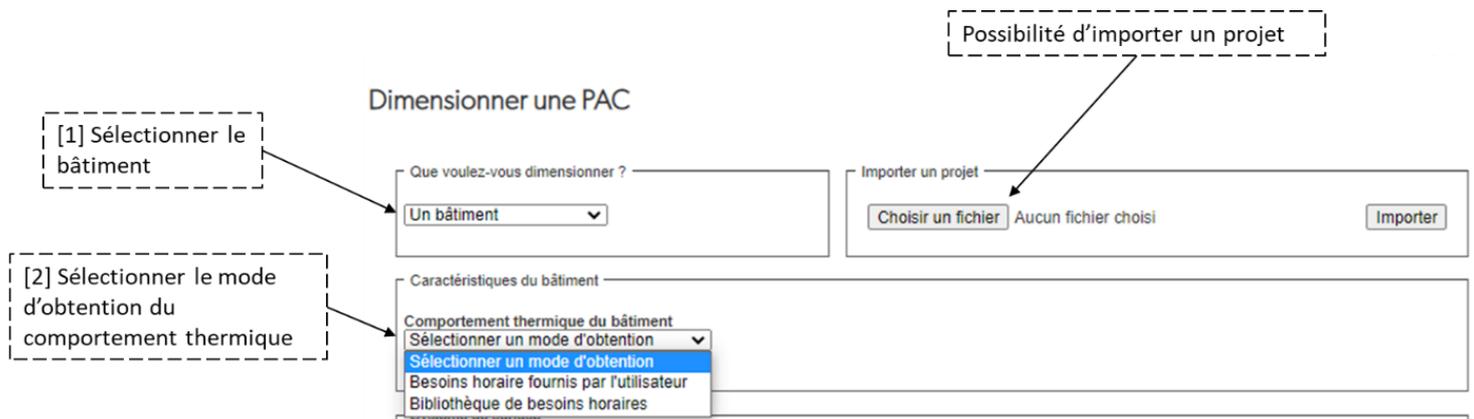


Figure 11 : Dimensionner un bâtiment

Une fois « **Un bâtiment** » sélectionné ([1], Figure 11) des menus apparaissent sur l'outil. En haut à droite vous avez la possibilité d'importer un projet provenant d'un téléchargement ultérieur sur l'outil de dimensionnement. Pour importer le fichier cliquer sur **choisir un fichier** et sélectionner le fichier zip complet, téléchargé lors d'un calcul précédent avec l'outil de dimensionnement.

## 2.3. Caractéristiques du bâtiment

**Comportement thermique du bâtiment** : le comportement thermique du bâtiment peut être renseigné de deux façons. 1) Importé directement à partir des fichiers fournis par l'utilisateur dans la partie **besoins horaire fournis par l'utilisateur**, 2) Calculé de façon standard en fonction du type de bâtiment et de la localisation géographique grâce au menu **Bibliothèque de besoins horaires**.

### 2.3.1. Besoins horaire fournis par l'utilisateur

Dans cette partie vous pouvez importer vos propres fichiers issus de mesures directes ou de simulations numériques pour renseigner les besoins en chauffage, les besoins de rafraîchissement, et les températures extérieures (°C). Pour cela le fichier en question doit être un fichier Excel ou texte de 8760 lignes encodé respectivement en ASCII et UTF8. Sur chaque ligne une valeur doit être présente, en Watt pour les besoins de chauffage et rafraîchissement et en Degrés Celsius pour les températures extérieures. Il est à noter que l'outil ne prend pas compte le mode thermo-frigo pompe, c'est-à-dire que si à un instant  $t$  il y a un besoin simultané en chaud et en froid, seul le besoin en chaud sera pris en compte par le moteur de calcul.

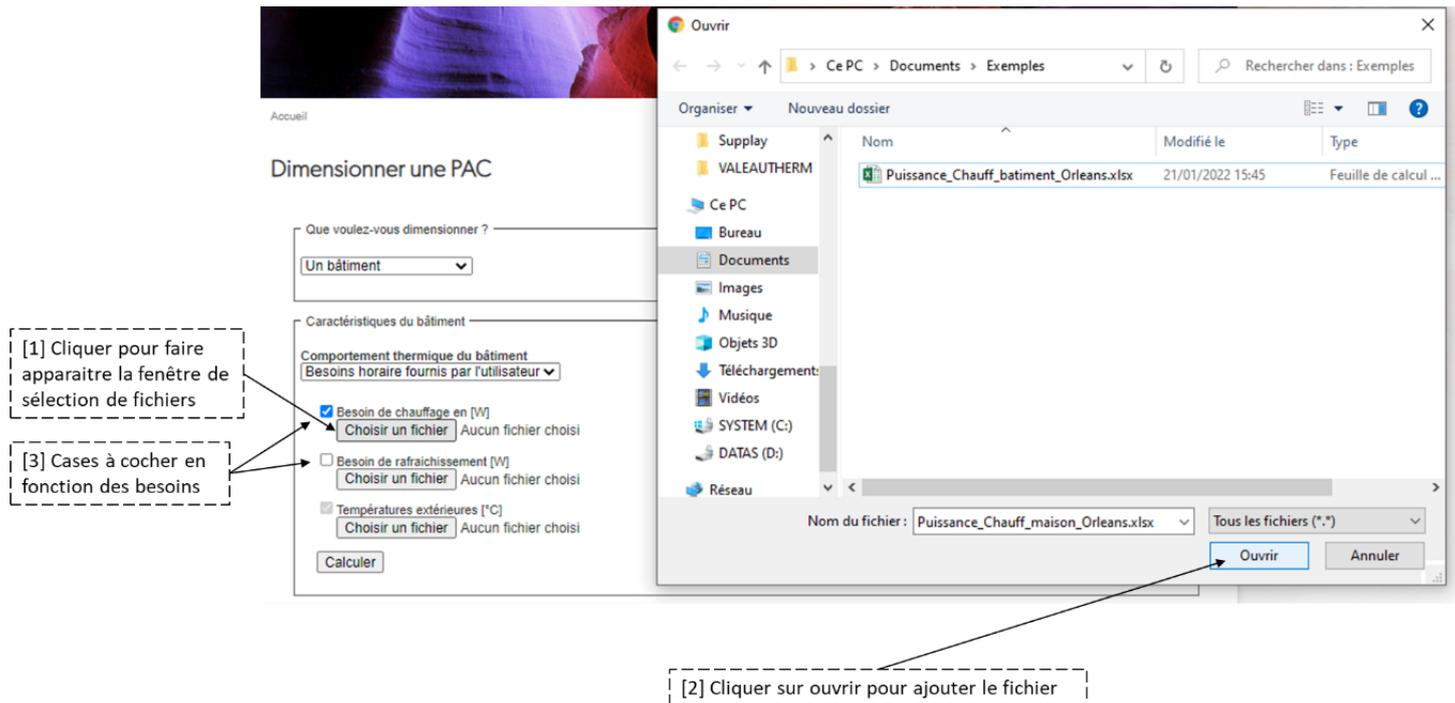


Figure 12 : Besoins horaire fournis par l'utilisateur

Cliquer sur **choisir un fichier** pour ouvrir la fenêtre de sélection de fichiers [1] de la Figure 12, sélectionner le fichier adapté et cliquer sur **ouvrir** pour importer le fichier sur l'outil ([2] Figure 12). Pour que l'outil prenne bien en compte le fichier, ne pas oublier de cocher les cases correspondantes aux besoins du bâtiment en question ([3] Figure 12).

### 2.3.2. Bibliothèque de besoins horaires

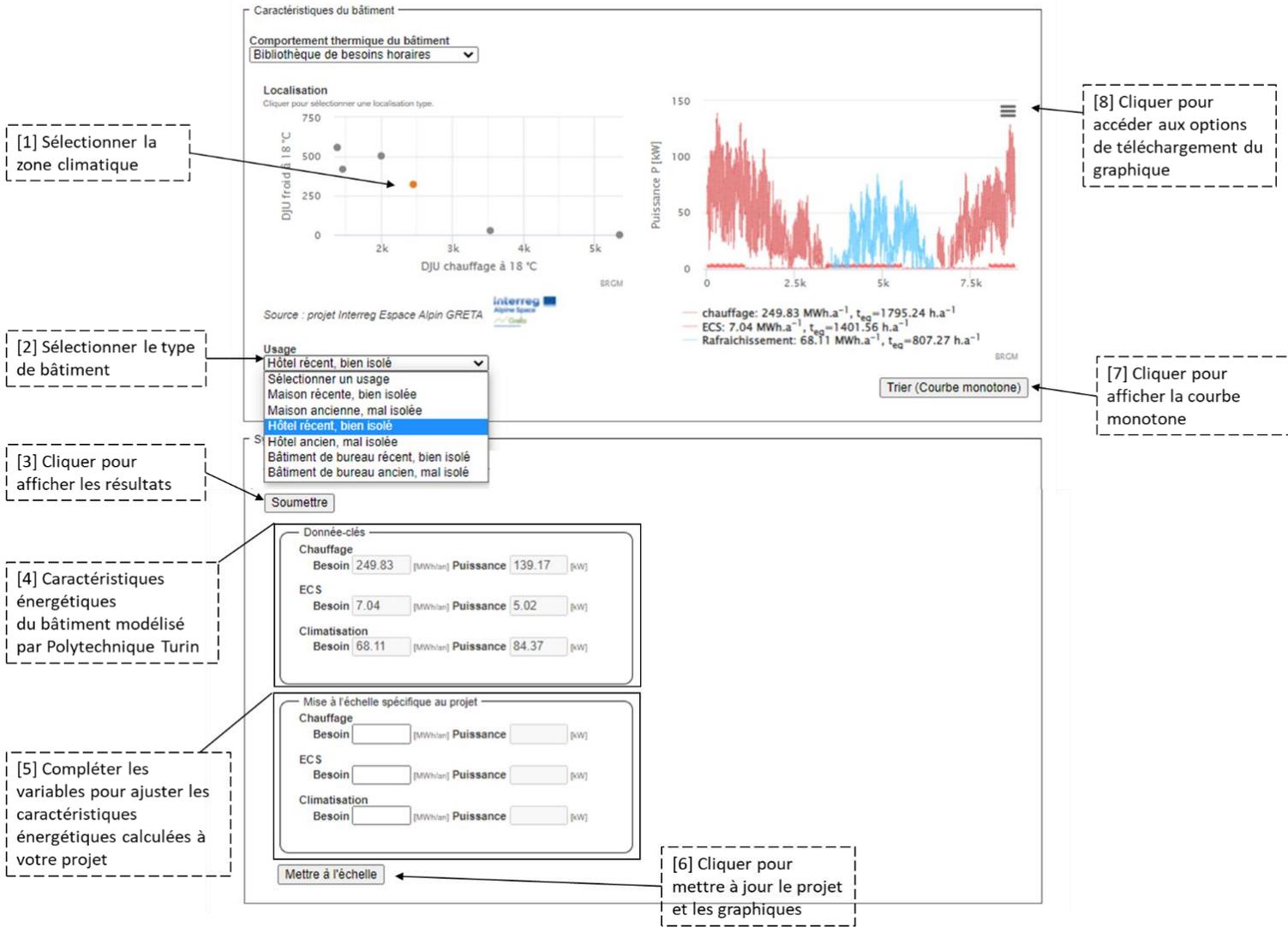


Figure 13 : Bibliothèque de besoins horaires

L'outil propose une bibliothèque de besoins horaires, cette bibliothèque est constituée de 6 zones climatiques et de 6 types de bâtiment. Ces données ont été produites dans le cadre du projet Européen Espace Alpin GRETA (2016-2018) (livrable D3.2, cf. <https://www.alpine-space.eu/projects/greta/en/home>) par Polytechnique Turin grâce au logiciel TRNSYS. Ces climats reflètent en fait une grande diversité de contextes climatiques. A titre d'exemple, la Figure 14 représente les Degrés Jours Unifiés (DJU<sub>18</sub>) en rafraîchissement et climatisation, calculés pour une température de référence de 18 °C, pour les localisations proposées par l'outil, et pour les villes françaises d'après la Réglementation Thermique RT2012 et le simulateur du CEGIBAT (<https://cegibat.grdf.fr/simulateur/calcul-dju>).

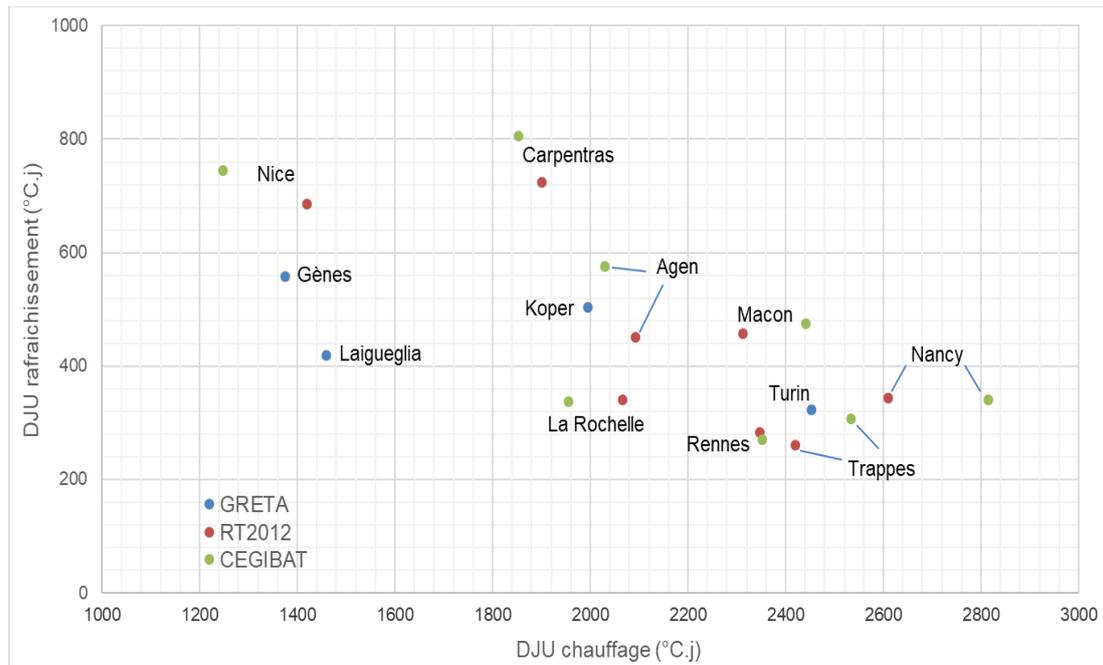


Figure 14 :  $DJU_{18}$  en chauffage et rafraichissement pour les climats proposés dans l'application (« GRETA ») et quelques villes en France (RT2012 et CEGIBAT).

**Localisation** : pour charger les données, choisissez la zone climatique qui représente au mieux la localisation de votre bâtiment ([1] Figure 13). Pour chaque zone, la température moyenne annuelle ainsi que les DJU de chauffage et de froid à 18°C sont affichés en passant la souris sur le point représentant la zone. Une fois la zone climatique sélectionnée le point apparaît en orange sur le graphique.

**Usage** : renseigner le type de bâtiment que vous voulez modéliser ([2] Figure 13), Cliquer sur « **Soumettre** » pour afficher les résultats [3] sur la Figure 13.

**Données clés** : des nouvelles fenêtres apparaissent dans l'outil ([4] Figure 13) et présentent les caractéristiques énergétiques du bâtiment modélisé par Polytechnique Turin à partir des choix effectués précédemment.

**Mise à l'échelle spécifique au projet** : il est possible de mettre à l'échelle les données présentées dans le projet de manière à les adapter à votre projet. Pour cela vous pouvez renseigner les consommations énergétiques du bâtiment en fonction du type d'utilisation ([5] Figure 13). Une fois les modifications effectuées pensez à cliquer sur **Mettre à l'échelle** ([6] Figure 13) pour ajouter vos valeurs au projet et modifier les graphiques.

A la suite du choix du bâtiment et après mise à l'échelle, deux graphiques peuvent être affichés : la courbe des besoins thermiques du bâtiment heure par heure et la courbe monotone ([7] Figure 13). Ces deux courbes peuvent être téléchargées en cliquant sur les trois traits en haut à droite du graphique ([8] Figure 13).

## 2.4. Systeme de surface

La fenêtre système de surface se décompose en 3 sous-parties, *PAC* ; *Appoint* et *Système de chauffage et de rafraichissement*.

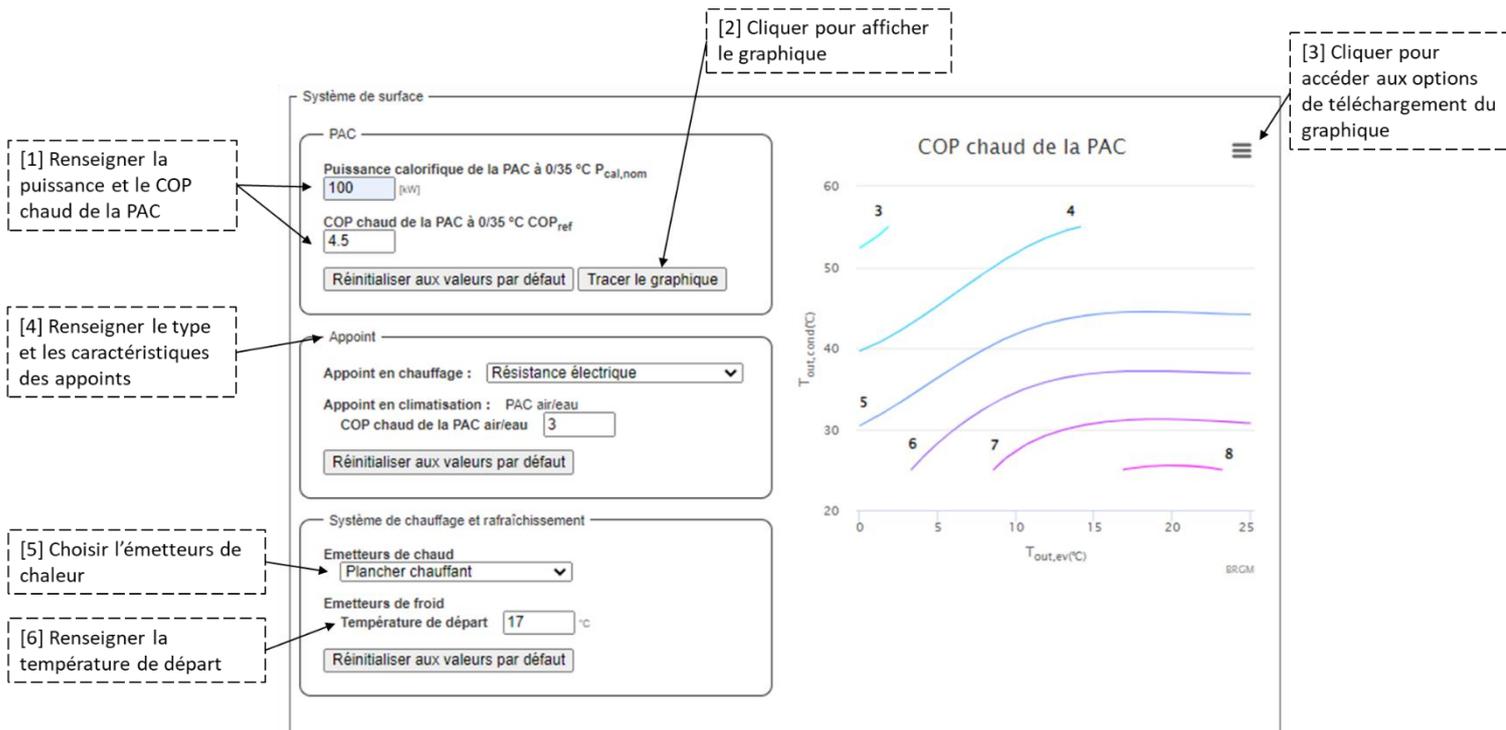


Figure 15 : Système de surface

**PAC** : renseigner la puissance calorifique ainsi que le COP de la PAC pour des températures d'évaporation et condensation respective de 0°C et 35 °C. Cliquer sur **Tracer le graphique** ([2] Figure 15) pour faire apparaître le graphique de l'évolution du COP de la PAC en fonction des températures d'entrée de l'évaporateur et de sortie du condensateur. Là encore il est possible de télécharger le graphique ([3] Figure 15).

**Appoint** : renseigner la source d'appoint pour le chauffage ([4] Figure 15). Pour le moment, seule la résistance électrique est prise en compte par l'outil. Compléter également le COP de la pompe à chaleur utilisée pour l'appoint en climatisation. Il faut noter que la production de chaud et de froid actif par géothermie fonctionne en priorité par rapport aux puissances d'appoint. La pompe à chaleur géothermique fonctionne donc au maximum pour couvrir les besoins en chauffage et en climatisation, et les appoints ne se déclenchent que pour couvrir les éventuels manques entre les besoins et ce que peut fournir la PAC. Les deux puissances d'appoint, une pour le chauffage et une pour la climatisation, sont calculées automatiquement par l'outil à chaque pas de temps, puis restituées, ainsi que les consommations énergétiques correspondantes.

**Système de chauffage et de rafraîchissement** : sélectionner le type d'émetteur chaud adapté à votre projet parmi le plancher chauffant, le radiateur basse température et le radiateur haute température ([5] Figure 15), une loi d'eau est associée à chaque émetteur (cf. Figure 16). Les émetteurs basse température permettent à la PAC de fonctionner avec de COP plus élevés. Renseigner la température de départ dans l'émetteur de froid, c'est-à-dire la température de sortie de l'évaporateur. Dans la partie « **bâtiment** » le geocooling n'est pas encore pris en compte par l'outil.

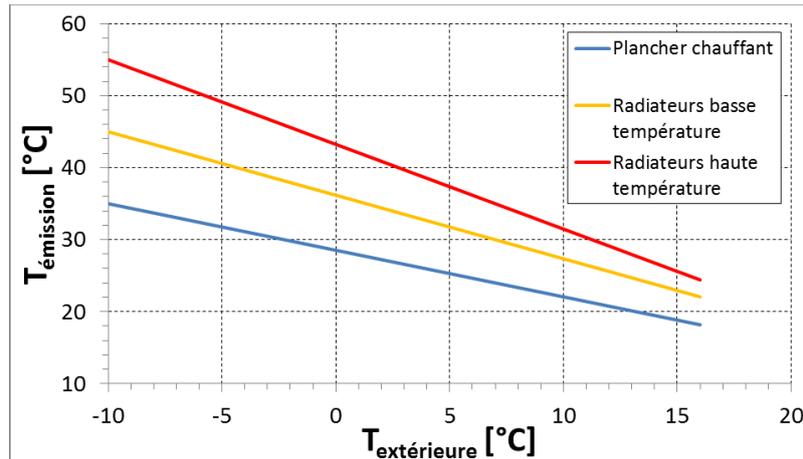


Figure 16 : Lois d'eau : température de départ du circuit de chauffage en fonction de la température extérieure pour les trois types d'émetteurs considérés.

## 2.5. Champ de sondes

L'avant dernière fenêtre de l'outil de dimensionnement aborde le champ de sondes.

Figure 17 : Champ de sondes

### 2.5.1. Résistance thermique du forage

Renseigner la résistance du forage ([1] Figure 17). La résistance thermique  $R_f$  traduit la capacité de la sonde à échanger de la chaleur avec le milieu encaissant. Elle fait intervenir trois termes : la convection forcée dans le tube, la conduction à travers le tube en PE, la conduction à travers le coulis (matériau de remplissage du forage). La résistance par convection dans le tube est généralement négligeable si l'écoulement est turbulent, mais ne l'est pas si le régime est laminaire.  $R_f$  peut être estimé au moyen d'un Test de Réponse Thermique (TRT) (Reiss et al., 2012). L'analyse des résultats d'une collecte de TRT montre que la valeur médiane de distribution de  $R_f$  est de l'ordre de 0,08 et 0,09  $K.m.W^{-1}$  (Maragna et al., 2021, 2020, 2019). Dans les « boîtes à moustaches » représentés en Figure 18, la boîte bleue s'étend du premier au dernier quartile, et couvre donc 50 % des valeurs ; la barre rouge centrale représente la valeur médiane ; les croix rouges représentent les points s'écartant considérablement de la

médiane ; les barres noires pointillées s'étendent du minimum au maximum de l'échantillon à l'exclusion de ces points. Les TRT sont généralement réalisés à l'eau claire (régime laminaire), tandis que l'installation fonctionne le plus souvent à l'eau glycolée (régime turbulent). L'application propose une valeur par défaut de 0,11 K.m.W<sup>-1</sup>.

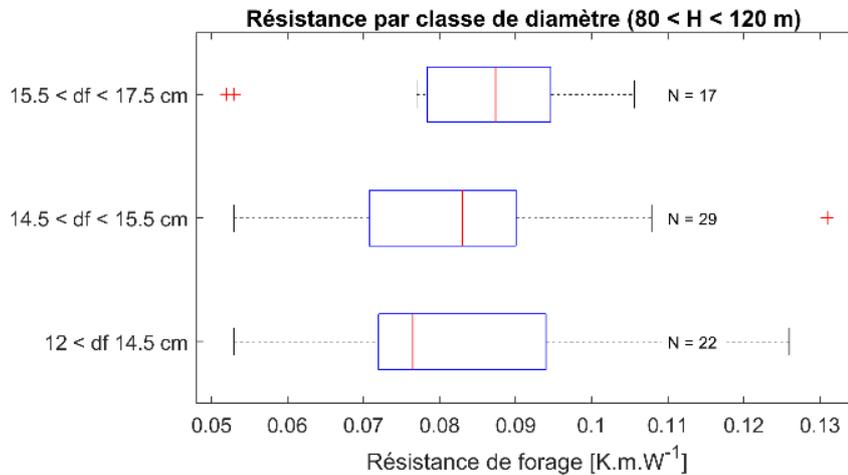


Figure 18 : Distribution statistique de résistance  $R_f$  par classe de diamètre pour 68 forages d'environ 100 mètres de profondeur (Maragna et al., 2021).

### 2.5.2. Profondeur

Rentrer la profondeur de la sonde type ([2] Figure 17).

### 2.5.3. Implantation des sondes

Choisir la configuration du champ de sonde ([3] Figure 17). Dans cette section il est possible de charger un fichier contenant sa propre implantation, les fichiers acceptés sont : les fichiers Excel encodés en UTF8, avec autant de lignes que de sondes et deux valeurs par ligne, ces valeurs sont les coordonnées en mètre selon l'axe X puis Y; les fichiers texte encodé en ASCII composés sur chaque ligne des coordonnées d'une sonde, les valeurs selon X et Y sont séparées par un espace ou un point-virgule.

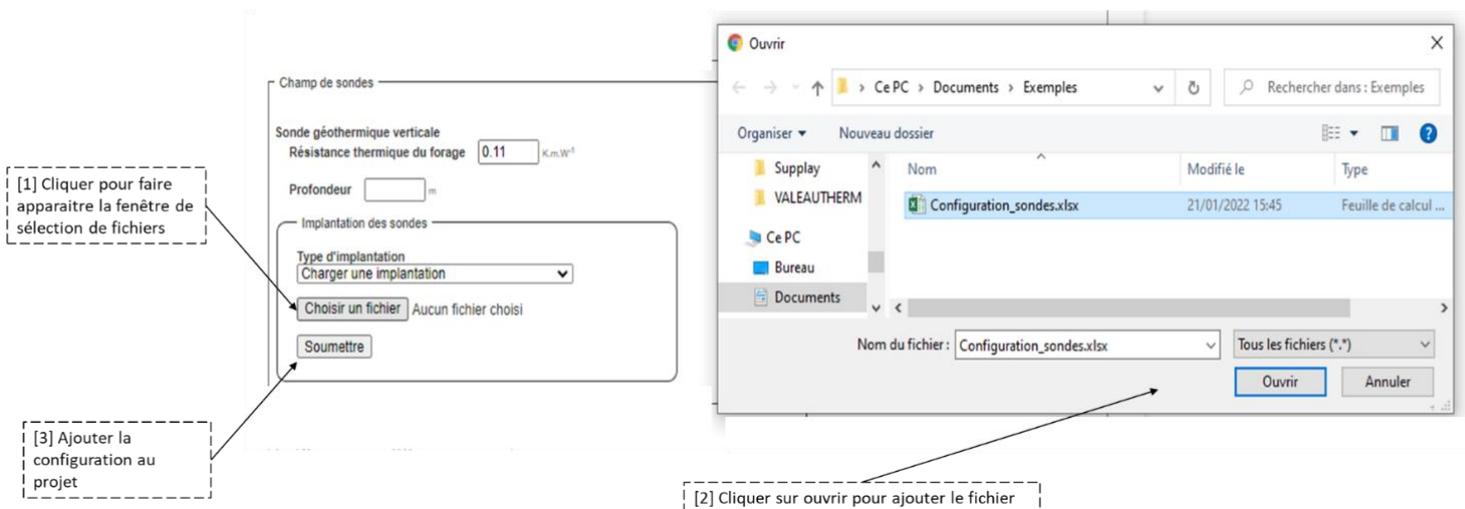


Figure 19 : Charger une implantation

## 2.5.4. Type d'implantation

### a) Charger une implantation

Cliquer sur **choisir un fichier** ([1] Figure 19), pour faire apparaître la fenêtre de sélection de fichiers. Sélectionner le fichier puis cliquer sur **ouvrir** [2], enfin ne pas oublier de soumettre la configuration au projet en cliquant sur **soumettre** ([3] Figure 17).

### b) Sélectionner un type d'implantation prédéfini

Figure 20 : Sélectionner un type d'implantation prédéfini

Commencer par renseigner la configuration du champ de sonde parmi les 4 possibles, en U, en L en rectangle et en rectangle évidé. Renseigner ensuite les écartements et le nombre de sonde suivant les axes x et y [1] de la Figure 20. Pour afficher la configuration et l'intégrer au projet cliquer sur **soumettre** [2]. Un graphique présentant la configuration apparaît, il est également téléchargeable ([3] Figure 20). Ce graphique fait apparaître le nombre total de forages.

D'un manière générale les configurations qui ont tendance à diminuer les interactions entre les sondes (U, L et rectangle évidé) sont à privilégier dans le cas où le champ de sondes ne répond qu'à un seul besoin (production de chaud ou de froid). Ces configurations peu denses permettent de dissiper plus efficacement dans le terrain l'excédent de chaud ou froid. Dans le cas où le champ sert à la fois au chauffage et à la climatisation, il peut être intéressant de privilégier une organisation plus dense ; le champ de sondes se rapproche alors d'un stockage intersaisonnier de chaleur.

Dans un premier temps, la longueur forée peut être estimée en supposant que chaque mètre linéaire peut fournir de l'ordre de  $40 \text{ W.m}^{-1}$ . En supposant que le COP de la PAC est de l'ordre de 4,5, la longueur à installer sera de l'ordre de  $L = 139\,000 \times (1-1/4,5) / 40 \approx 2\,700 \text{ m}$ . La longueur qui en résulte sera à affiner au vu des résultats de la simulation. Pour le premier calcul, on a choisi 16 forages profonds de 150 m, soit une longueur totale légèrement différente ( $L \approx 2\,400 \text{ m}$ ).

## 2.5.5. Terrain

The screenshot shows a 'Terrain' configuration window with the following elements and callouts:

- [1]** Sélectionner « connue par un TRT » : Points to the dropdown menu for 'Température initiale'.
- [2]** Renseigner la température : Points to the input field for 'Température initiale moyenne du terrain' (14.5 °C).
- [3]** Cocher pour mettre à jour avec la profondeur : Points to the checked checkbox 'Mettre à jour avec la profondeur'.
- [4]** Remplir les variables : Points to the input fields for 'Gradient géothermique' (3 °C / 100m) and 'Profondeur de la sonde-test' (100 m).
- [5]** Sélectionner un mode d'obtention : Points to the dropdown menu for 'Propriétés thermiques'.
- [6]** Ajouter les valeurs : Points to the input fields for 'Conductivité thermique' (2 W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>) and 'Capacité calorifique' (2 MJ.K<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup>).

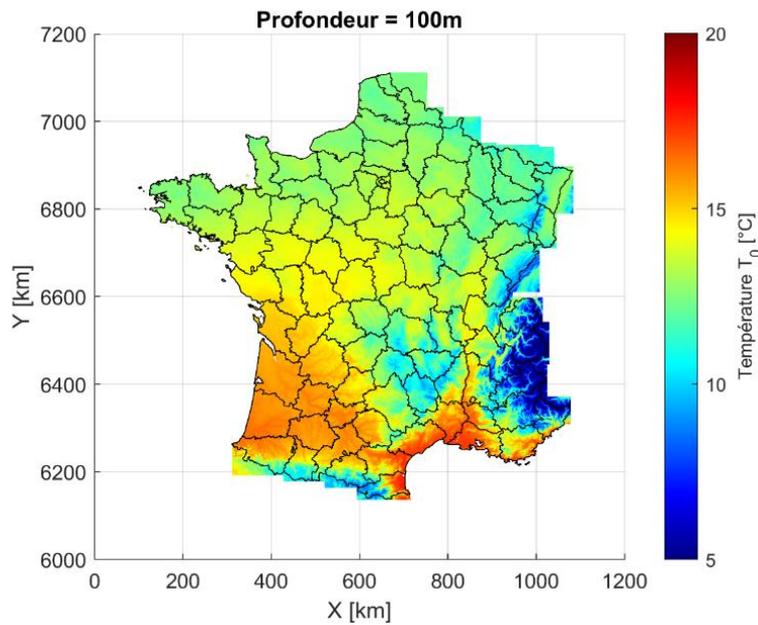
Figure 21 : Terrain

### c) Température initiale

sélectionner « **connue par un TRT** » dans le menu déroulant [1] de la Figure 21, l'interface se met à jour.

### d) Température initiale moyenne du terrain

Renseigner la température moyenne du terrain  $T_0$  ([2] Figure 21). Si le TRT n'a pas encore été réalisé,  $T_0$  peut être estimée en fonction de la latitude, la longitude, l'altitude et la profondeur au moyen de la méthode décrite en (Maragna et al., 2020). Cette méthode, calée sur 191 TRT répartis sur toute la France métropolitaine, permet de reproduire  $T_0$  avec un écart-type de l'ordre de  $\approx 1,2$  °C. Dans 50 % des cas,  $T_0$  est même prédit avec une erreur inférieure à 0,7 °C. Cette méthode simplifiée peut donc permettre d'estimer rapidement  $T_0$  en phase de pré-projet, avant qu'un TRT ne soit réalisé. Appliqué à l'ensemble de la France métropolitaine, ce modèle fait apparaître un gradient de température orienté du Nord-Est vers le Sud-Ouest, des températures basses en altitude et élevées autour du bassin parisien. Une alternative peut être de consulter les TRT bancarisés dans le volet cartographique de <https://www.geothermies.fr/>.



Équation 3 : Température moyenne estimée  $T_0$  pour une sonde profonde de 100 m (Maragna et al., 2021).

La profondeur indiquée du forage peut différer de la profondeur de la sonde-test. Pour mettre à jour la température avec la profondeur, cocher la case [3]. Renseigner le gradient géothermique de la zone d'implantation et la profondeur de la sonde-test ([4] Figure 21), ces données permettront de calculer une température moyenne du terrain quelle que soit la profondeur des sondes envisagées.

### e) Propriétés thermiques

Dans le menu propriété thermique 2 choix sont possibles : **connues par un TRT** et **Inconnues : estimation bibliographique**. Si vous choisissez **connues par un TRT** ([5] Figure 21), renseigner la **conductivité thermique** en  $W.K^{-1}.m^{-1}$  et la **capacité calorifique**  $MJ.K^{-1}.m^{-3}$  du sous-sol ([6] Figure 21). Si ces valeurs sont inconnues sélectionner **inconnues : estimation bibliographique** ([7] Figure 22) puis sélectionner le type de sol rencontré à la profondeur d'implantation de l'échangeur géothermique choisi ([8] Figure 22).

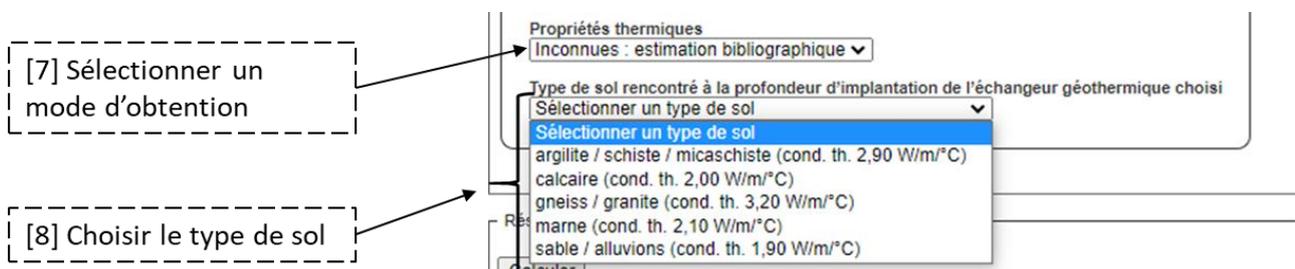


Figure 22 : Propriétés thermiques inconnues

Le paramètre de conductivité thermique a un impact important sur le dimensionnement du champ de sondes, un TRT doit être réalisé afin de déterminer précisément ce paramètre. La Figure 23 présente la distribution de conductivité thermique pour les principales lithologies rencontrées en France. Si la lithologie est connue (par exemple un forage de reconnaissance

ou une analyse géologie préalable) avant les résultats du TRT, un point de départ peut être de prendre la valeur médiane de la distribution de conductivité thermique.

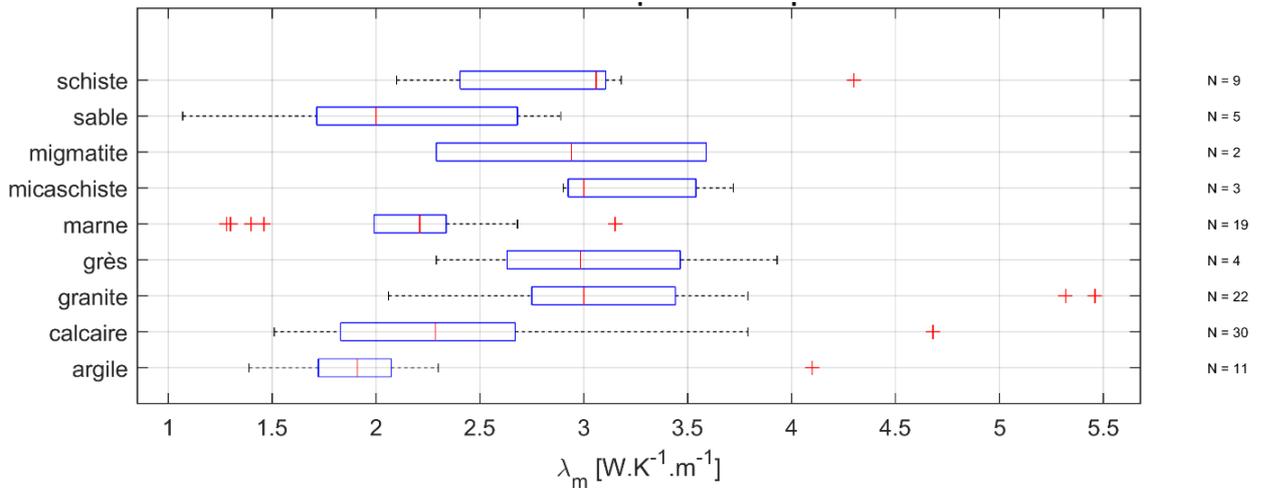


Figure 23 : Distribution de la conductivité mesurée par TRT sur 105 forages dont plus de 80% de la hauteur traverse une seule lithologie (Maragna et al., 2021). Le nombre de TRT par lithologie est affiché à droite.

## 2.6. Résultats

Une fois tous les champs renseignés cliquer sur **calculer** dans la sous-partie **résultats** ([1] Figure 24), cela peut prendre 1 minute avant que les résultats s'affichent.

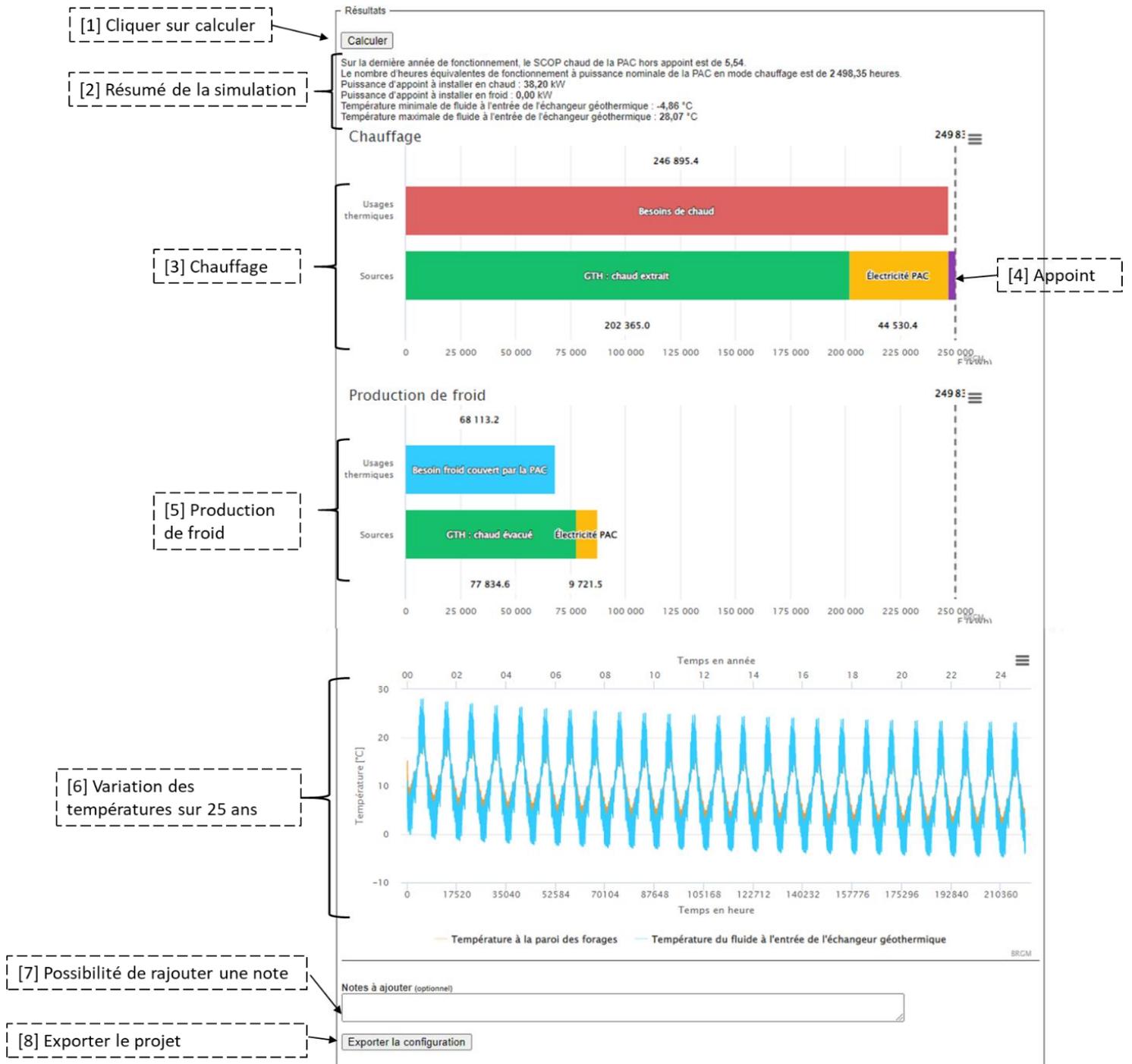


Figure 24 : Résultats bâtiment

Dans la première partie [1] de la Figure 24 on obtient un bloc de texte qui contient les informations suivantes :

- Le SCOP de la PAC sur la 25<sup>ème</sup> année de fonctionnement, qui correspond au coefficient de performance annuel de la PAC sans prendre en compte les circulateurs du côté bâtiment et du côté du champ de sondes.
- Le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC en mode chauffage est également indiqué. Il s'agit du ratio entre la consommation de

chauffage et la puissance de la PAC. Cette valeur est par exemple demandée par l'ADEME pour l'instruction des dossiers du Fonds Chaleur.

- Les puissances d'appoint chaud et froid à installer et les températures minimale et maximale du fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique sont présentés. Dans notre exemple la température minimale de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique est de  $-4,86\text{ }^{\circ}\text{C}$ , les paramètres du champ de sondes sont donc à revoir pour passer au-dessus du seuil de  $-3^{\circ}\text{C}$  (critère de dimensionnement retenu).

Dans la partie [3] de la Figure 24 les consommations énergétiques à la 25<sup>ème</sup> année (en kWh) pour le chauffage sont détaillées, la couleur violette correspond à l'appoint électrique ([4] Figure 24). Pour la production de froid on retrouve la même organisation, partie [5] de la Figure 24. Pour le mode froid actif une simplification est faite en fixant la variation de température du fluide dans l'émetteur à  $5^{\circ}\text{C}$ . La comparaison des deux barres vertes, à savoir le chaud prélevé en mode chauffage (ici 202,37 MWh/a) et le chaud réinjecté en mode climatisation (ici 77,84 MWh/a), montre que le bilan d'énergie sur le champ de sondes n'est pas totalement déséquilibré.

Dans la partie [6] de la Figure 24, les variations des températures à la paroi des forages et des températures du fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique sont présentées sur une période de 25 ans avec un pas de temps d'une heure. Sur cet exemple on observe une baisse de température car le bilan d'énergie sur le champ est négatif. Cette baisse tend néanmoins à se stabiliser car du chaud est tout de même réinjectée en été.

En bas de page il est possible de rajouter une note sur la simulation effectuée ([7] Figure 24).

Le bouton « **exporter la configuration** » [8] de la Figure 24 vous permettra de télécharger les données et les résultats de votre étude sous la forme d'un fichier zip. Ce fichier de données générées peut être chargé dans l'outil pour débiter une nouvelle étude (cf. Importer un projet). Le contenu du fichier zip est présenté dans la Figure 25.

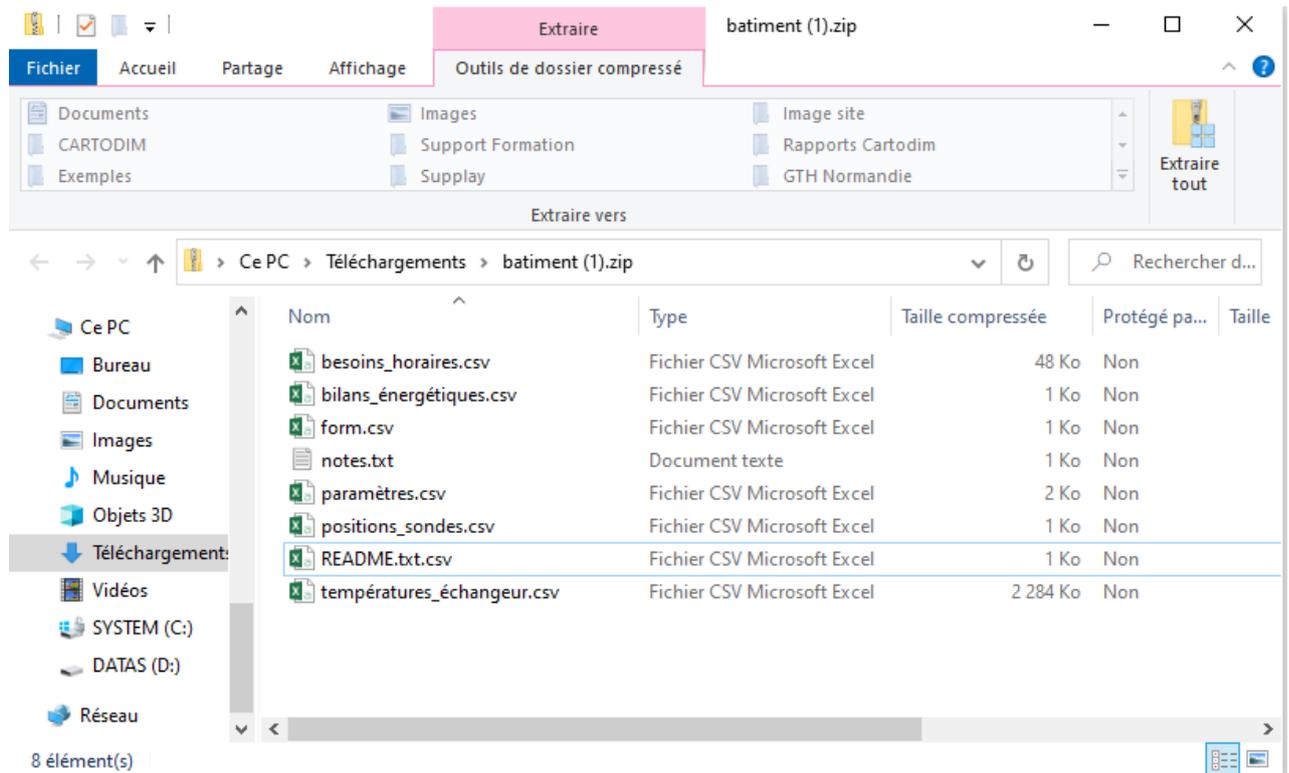
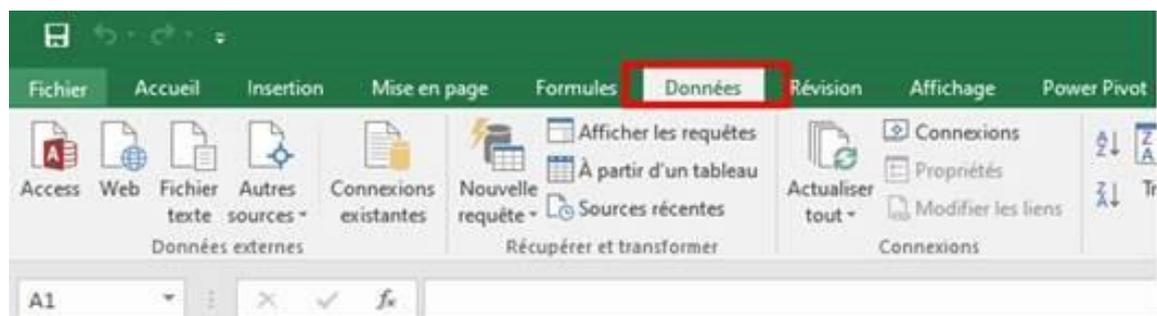


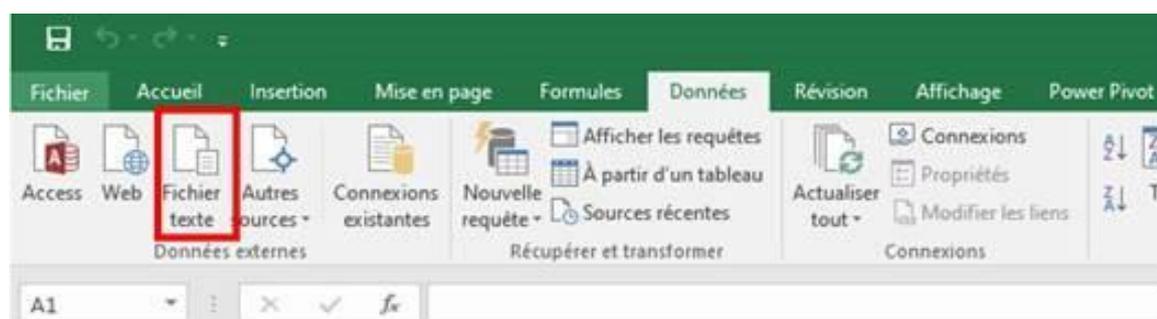
Figure 25 : Contenu du fichier zip.

**Note pour l'ouverture des csv dans Excel :** les fichiers csv téléchargés sont encodés via l'encodage universel UTF8.

Pour un affichage correct du texte dans Excel, il faut :  
Cliquer sur l'onglet « **Données** » en haut de la fenêtre

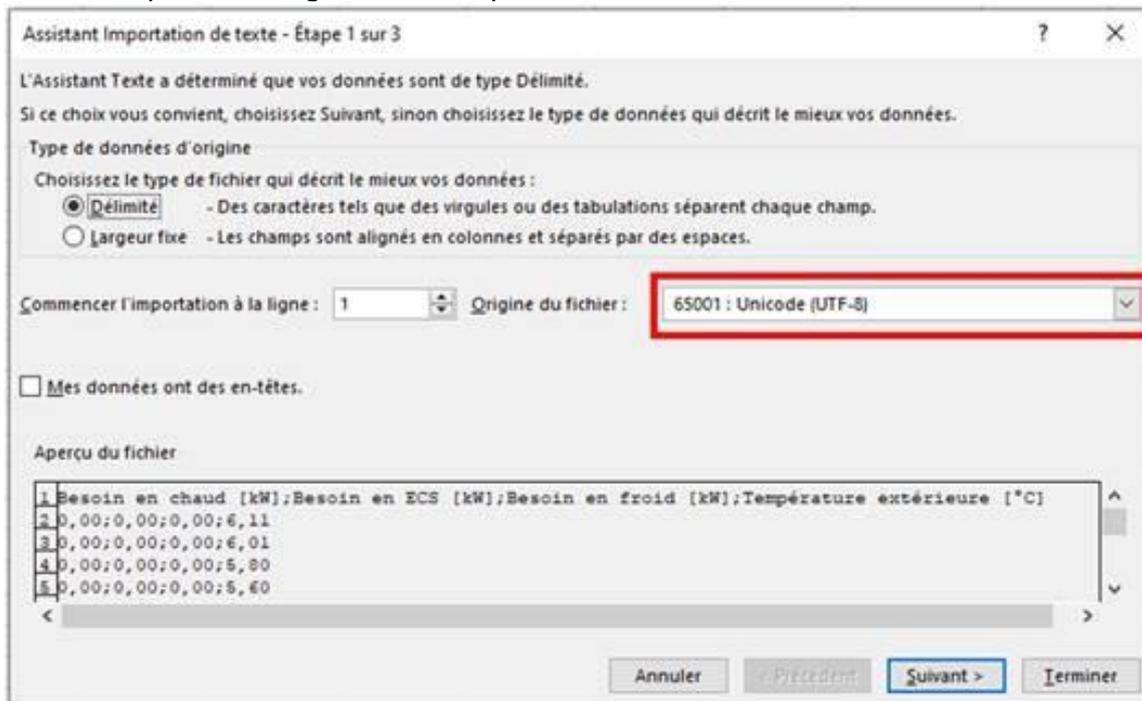


Cliquer sur « **Fichier texte** » dans l'encart « **Données externes** » en haut à gauche,

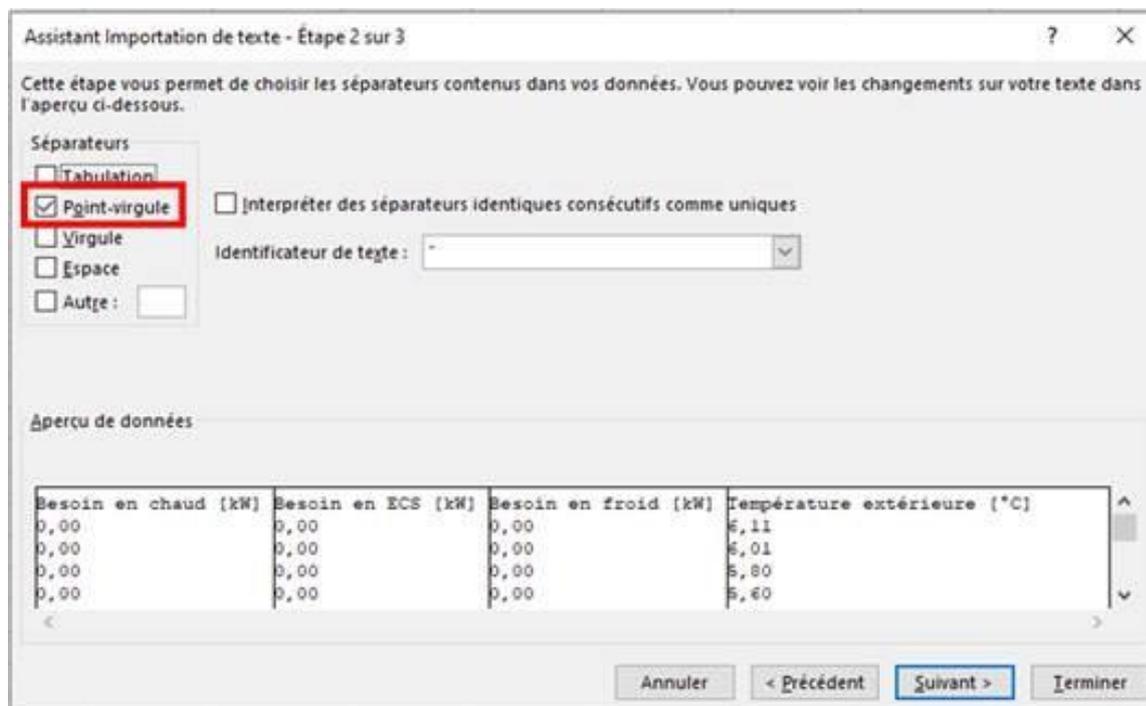


Sélectionner un fichier puis « **Importer** »

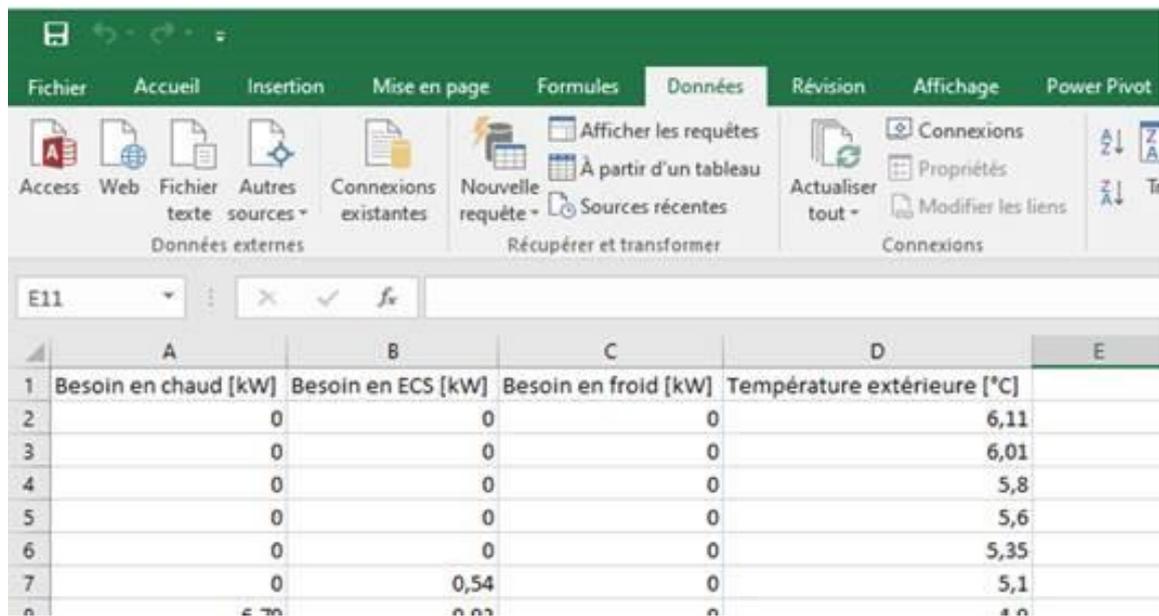
S'assurer que l'encodage UTF8 est spécifié est « **UTF8** »



Choisir « **point-virgule** » comme séparateur



Le texte sera correctement affiché



The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the 'Données' (Data) ribbon selected. The ribbon includes options for 'Données externes' (Access, Web, Fichier texte, Autres sources), 'Récupérer et transformer' (Nouvelle requête, Afficher les requêtes, À partir d'un tableau, Sources récentes), and 'Connexions' (Actualiser tout, Connexions, Propriétés, Modifier les liens). Below the ribbon, the active cell is E11. The data table is as follows:

	A	B	C	D	E
1	Besoin en chaud [kW]	Besoin en ECS [kW]	Besoin en froid [kW]	Température extérieure [°C]	
2	0	0	0	6,11	
3	0	0	0	6,01	
4	0	0	0	5,8	
5	0	0	0	5,6	
6	0	0	0	5,35	
7	0	0,54	0	5,1	
8	5,70	0,03	0	4,0	