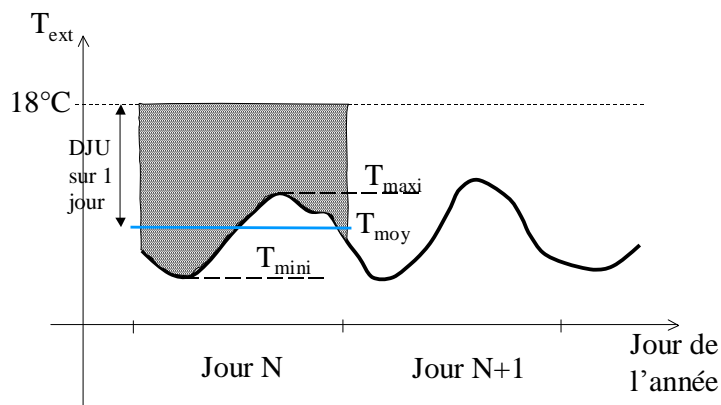


2] Degrés Jours Unifiés (DJU) (Unités : °C.jour)

Les 2 méthodes qui sont présentées par les auteurs sont basées sur des études statistiques. La première méthode utilise les données du livre de Jacques Bernier portant sur 225 jours de chauffage. La seconde méthode est basée sur les statistiques présentées dans le mémotech de génie énergétique sur une période de chauffage de 232 jours.

Méthode 1 :

L'analyse des données des stations météorologiques donne une relation linéaire entre les DJU et les T_B .



Si on ne dispose de la valeur du DJU annuel, on pourra utiliser la formule suivante :

$$DJU = -100,51 \cdot T_B + 1704,1$$

On pourra si on exploite la fonction de répartition de la température obtenir la valeur des DJU annuels. Les DJU sont définis sur l'ensemble de la saison de chauffage.

Les DJU sur une journée représentent l'écart entre 18°C et la température moyenne T_{moy} . En hiver T_{moy} est donnée par $(T_{maxi} + T_{mini})/2$ et en mi-saison le calcul est un différent puisque $(T_{maxi} > 18^\circ C > T_{mini})$. La méthode dite des professionnels de l'énergie est la suivante :

On relève les DJU sur 1 jour :

- en hiver, cas fréquent : si $T_{maxi} < 18^\circ C$: $DJU = 18 - T_{moy}$

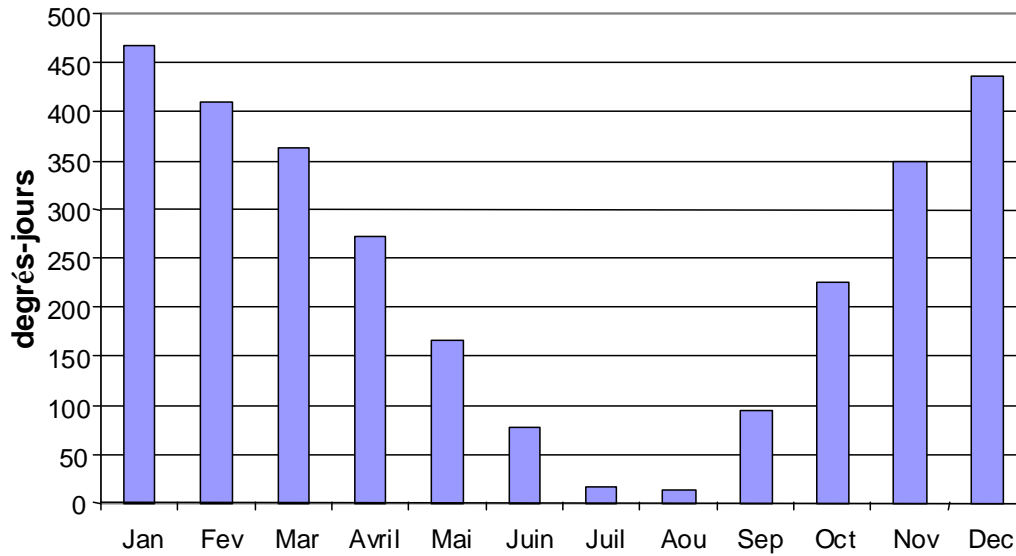
- si $T_{mini} \geq 18^\circ C$: $DJU = 0$

- en mi-saison : si $T_{mini} < 18^\circ C < T_{maxi}$:

$$DJU = (18 - T_{mini}) \left[0,08 + 0,42 \frac{(18 - T_{mini})}{(T_{maxi} - T_{mini})} \right]$$

On peut cependant les définir mensuellement.

DJU mensuel à Lille

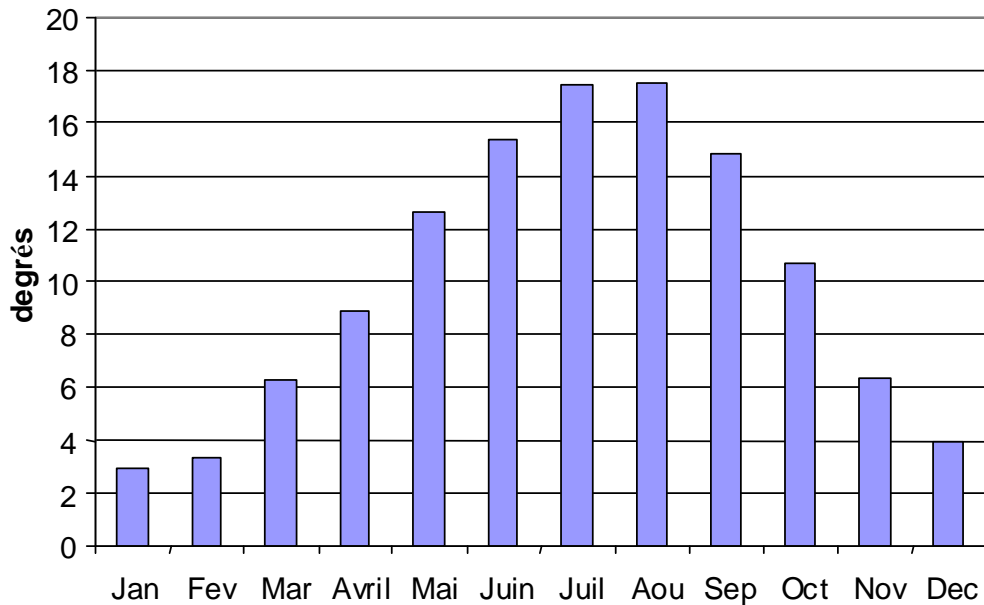


Exemple : Degrés-jours mensuel DJUm pour la ville de Lille.

Il est possible d'obtenir les DJU mensuels DJUm à partir de la température moyenne T_{moy} du mois m et vice-versa par la relation suivante :

$$DJUm = (18 - T_{moy}) \cdot N_{jm} \quad \text{où } N_{jm} \text{ représente le nombre de jours du mois } m.$$

Température moyenne à Lille



Exemple : Température moyenne T_{moy} pour la ville de Lille.

La répartition réelle $f(T_{ext})$ des températures suit une loi de Weibull :

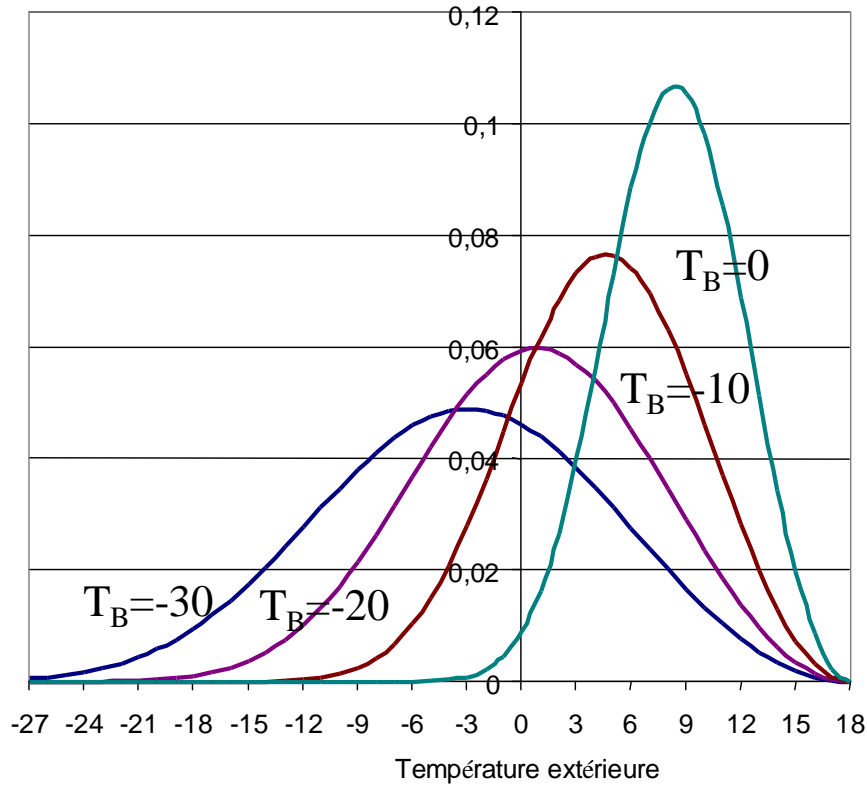
$$f(T_{\text{ext}}) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{18-T_{\text{ext}}}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{18-T_{\text{ext}}}{\lambda}\right)^k\right)$$

Les coefficients sans dimension k et λ sont donnés par :

$$\lambda = -0,433.T_B + 11$$

$$k = 3$$

Fonction de répartition des degrés-jours suivant la température T_B

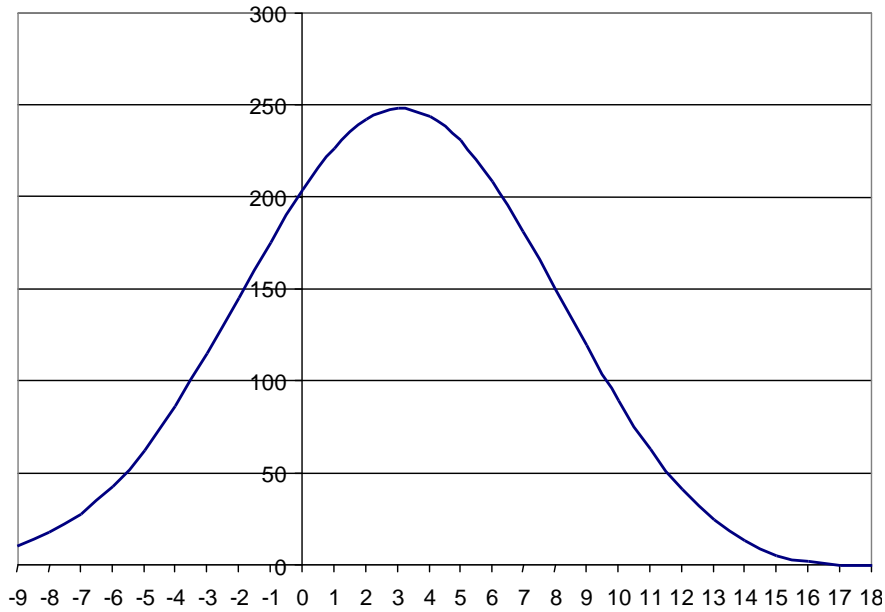


$$\int_{T_B}^{18} f(T_{\text{ext}}) dT_{\text{ext}} = 1 = 100\% \text{ ici } f \text{ est en } ^\circ\text{K}^{-1}$$

Une saison de chauffe moyenne en France est de 225 jours, les DJU peuvent alors être définis par :

$$\text{DJU} = \int_{T_B}^{18} F(T_{\text{ext}}) dT_{\text{ext}}$$

où $F(T_{\text{ext}}) = 225 \cdot f(T_{\text{ext}}) \cdot (18 - T_{\text{ext}})$ où $F(T_{\text{ext}})$ est en nombre de Jours.

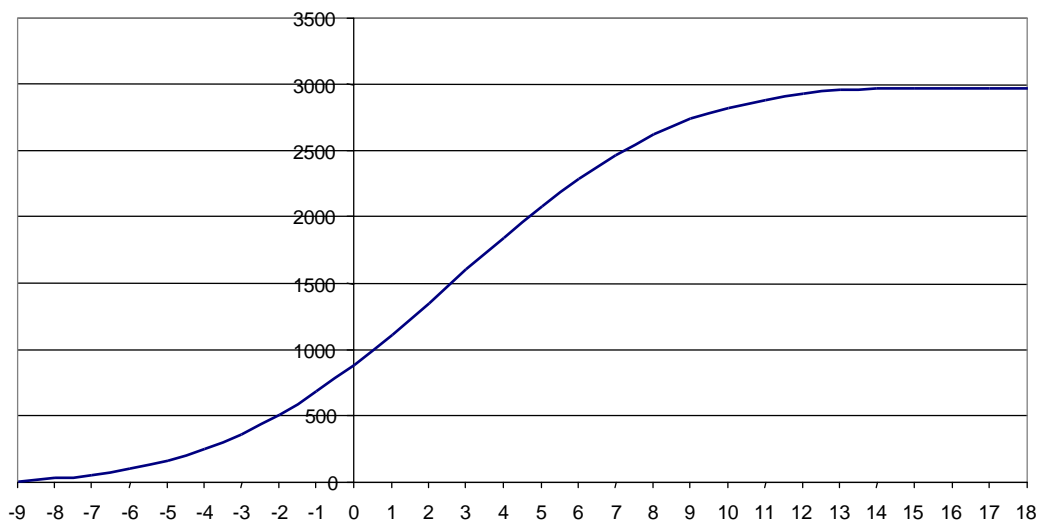


Exemple : Tracé de $F(T_{ext})$ pour $T_B = -9^\circ\text{C}$.

La fonction $F(T_{ext})$ permet de connaître le nombre de jours où la température passera par une valeur de T_{ext} . Le dimensionnement d'une installation de chauffage n'est pas forcément calculé pour une température de base T_B , car la chaudière risque d'être surdimensionnée une majeure partie de la saison de chauffe uniquement pour satisfaire les jours les plus froids. Un appoint utilisant un poêle à bois peut suffire à compléter les besoins thermiques extrêmes. La connaissance de $F(T_{ext})$ permet de connaître le nombre de jours où on voudrait substituer l'utilisation de la chaudière par exemple par le poêle pendant les grands froids.

Les degrés-jours DJU peuvent être définis par la fonction $DJ(T_{ext})$, ainsi :

$$DJ(T_{ext}) = \int_{T_B}^{T_{ext}} F(T_{ext}) dT_{ext}$$



Exemple : Tracé de $DJ(T_{ext})$ pour $T_B = -9^\circ\text{C}$.

On trouve alors les DJU :

$$DJU = DJ(18^{\circ}\text{C})$$

De même pour une PAC qui ne peut pas fonctionner en-dessous d'une valeur $T_{\min} > T_B$, on peut connaître le taux τ_{nc} de non fonctionnement de la PAC pendant la période de chauffage par :

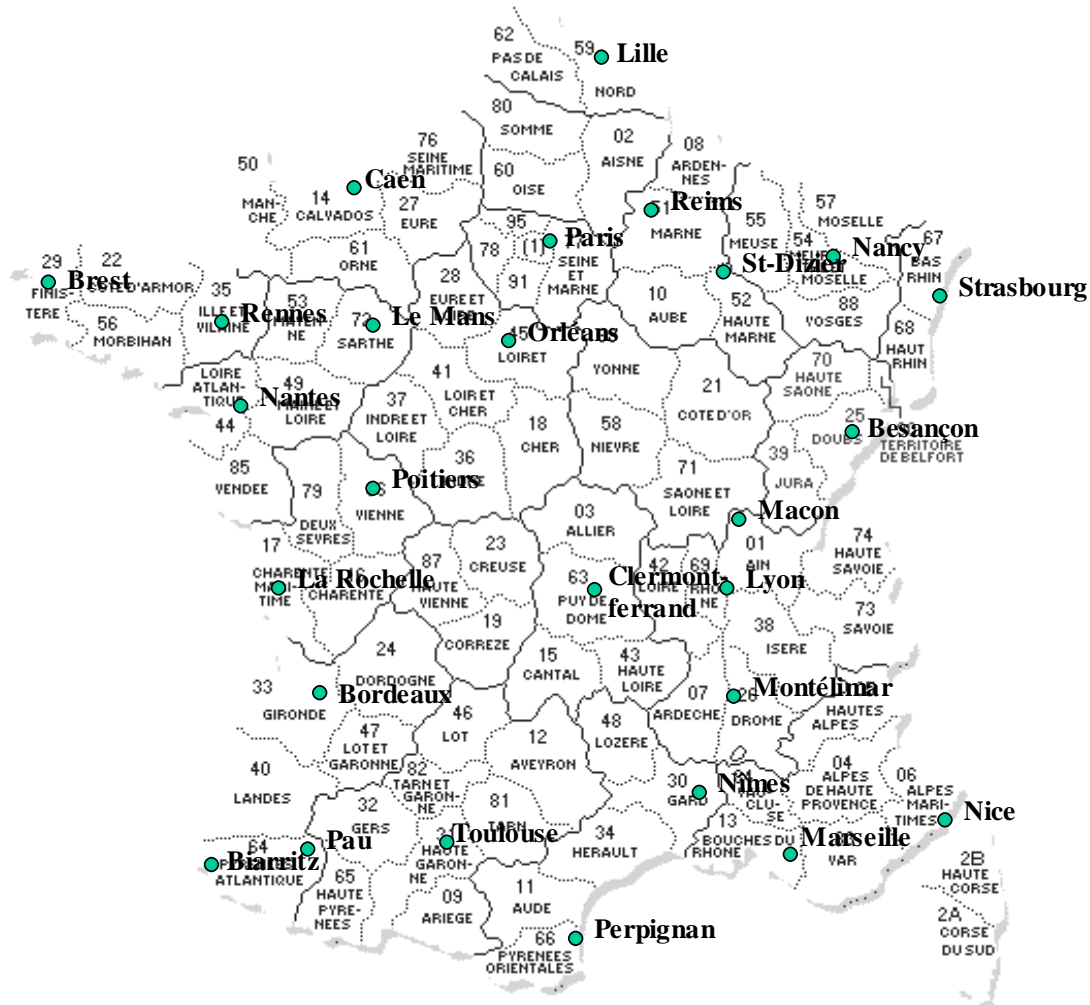
$$\int_{T_B}^{T_{\min}} f(T_{\text{ext}}) dT_{\text{ext}} = \tau_{nc}$$

Méthode 2 :

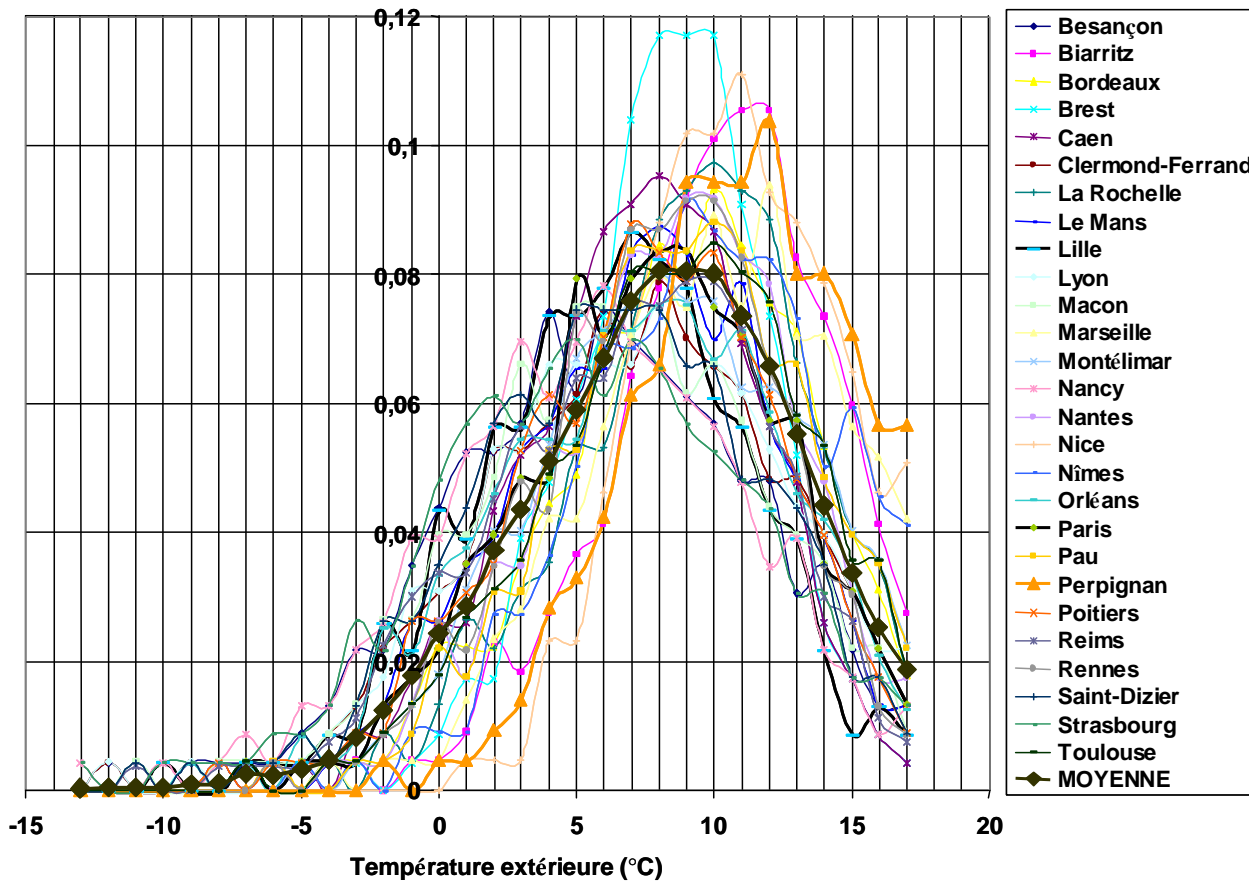
Cette méthode est une variante de la précédente. La fonction de répartition est presque identique mais au lieu d'avoir 18°C, on substitue une valeur appelée T_m qui sera définie par statistique sur 27 villes réparties régulièrement sur toute la France.

Comme pour la méthode 1, si on ne dispose de la valeur du DJU annuel mais disposant de la température de base hiver T_{BH} et de la température de base été T_{BE} , on pourra utiliser la formule suivante :

$$DJU = -113.T_{BH} - 71.T_{BE} + 3670$$



Fonction de répartition (°C⁻¹) (232 jours de chauffage)



Cette fois, on a besoin de 2 températures caractéristiques du lieu : T_{BH} et T_{BE} qui sont respectivement la température de base hiver (ou T_B) et la température de base été.

$$f(T_{ext}) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{T_m - T_{ext}}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{T_m - T_{ext}}{\lambda}\right)^k\right)$$

Les coefficients sans dimension k , λ et T_m sont donnés par :

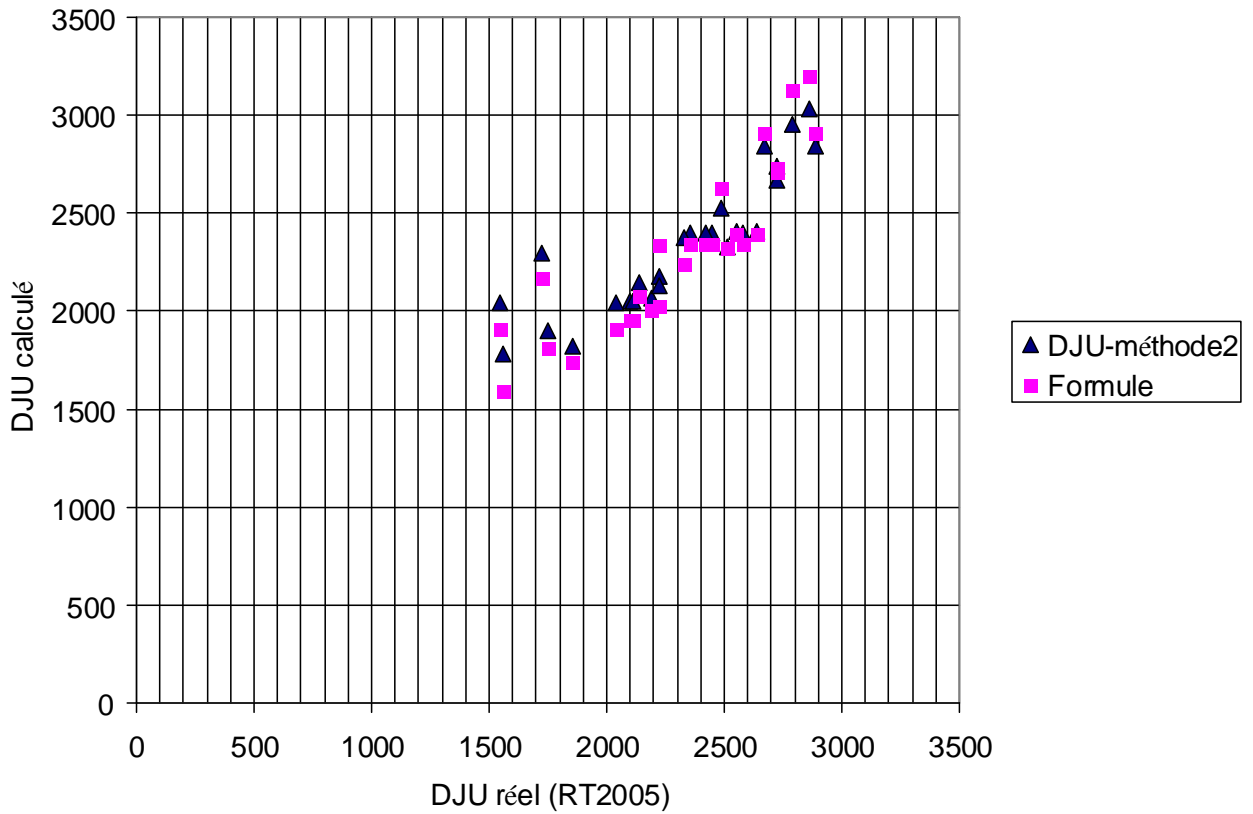
$$\lambda = -0,44 \cdot T_{BH} + 0,35 \cdot T_{BE}$$

$$\text{on prend } T_m = 0,66 \cdot T_{BE} \text{ si } T_m > 18^\circ\text{C} \text{ sinon } T_m = 18^\circ\text{C}$$

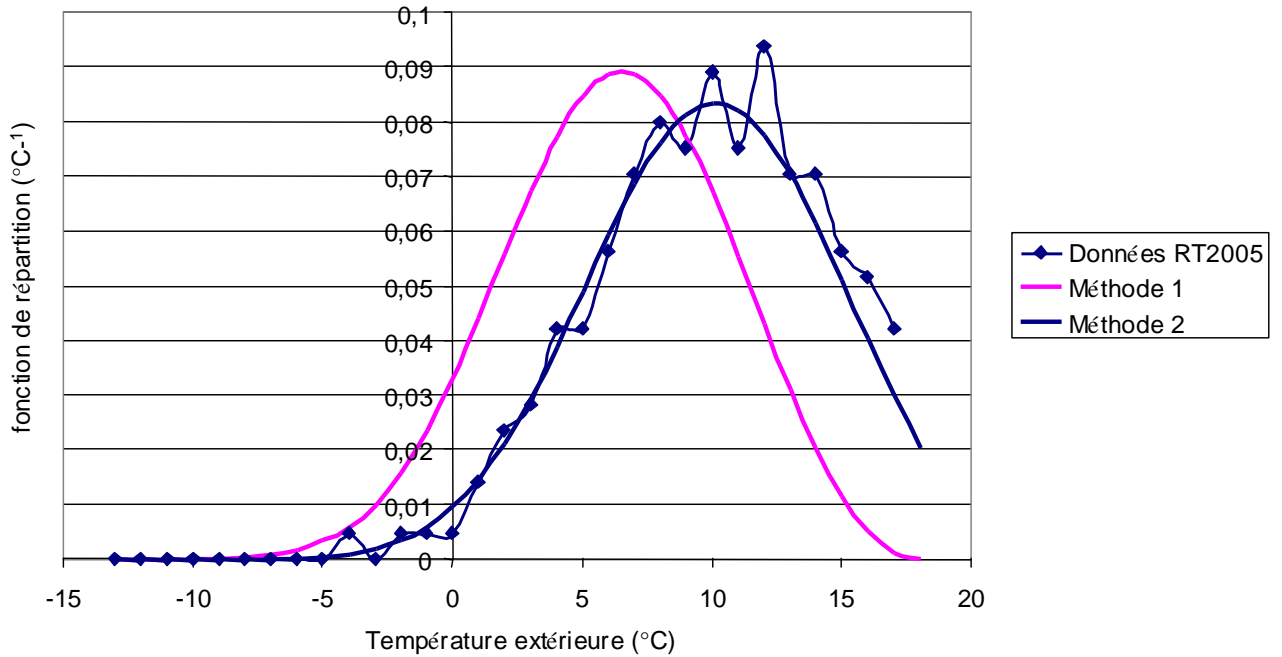
$$k = 3$$

Si on ne connaît pas les DJU du lieu, nous avons le choix entre utiliser la relation simplifiée dans la méthode 2 (formule) ou utiliser dans un tableau la fonction de répartition (DJU-méthode 2). A titre de comparaison, nous avons tracé ces 2 choix en fonction du DJU connu par la RT2005. Les relations sont assez satisfaisantes sauf pour les valeurs de DJU faible (sud de la France). Cela est assez logique car la méthode suppose 232 jours de chauffage, alors que par exemple pour Perpignan, on a seulement 212 jours de chauffage dans le tableau du mémotech. On utilisera donc cette méthode pour la moitié Nord de la France.

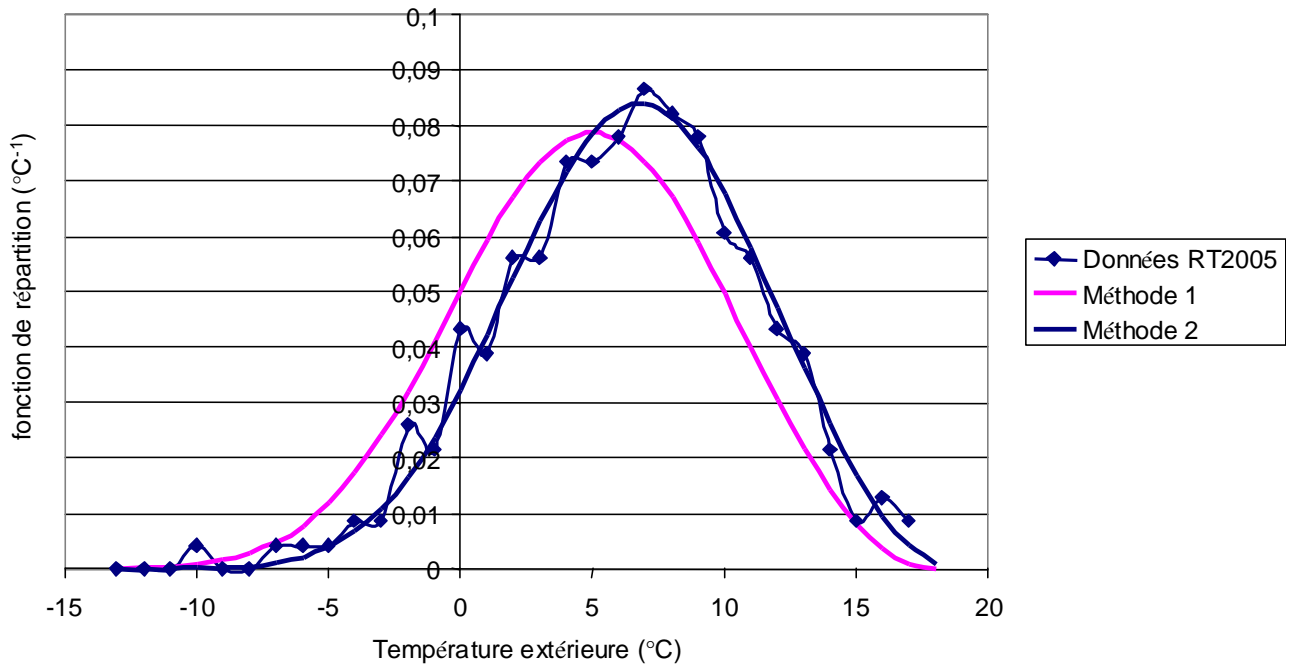
Méthode 2



Comparaison des 2 méthodes (Ville de MARSEILLE)



Comparaison des 2 méthodes (Ville de LILLE)



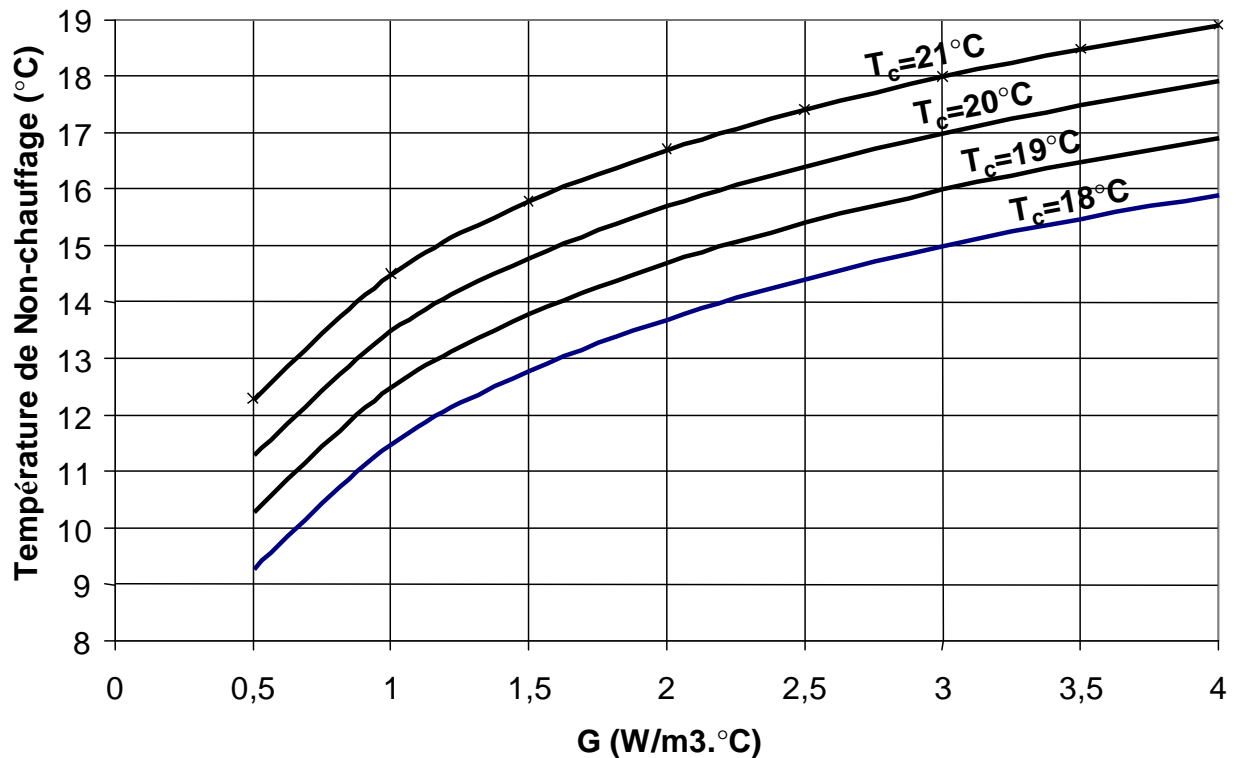
	Besançon	Biarritz	Bordeaux	Brest	Caen	Clermont-Ferrand	La Rochelle	Le Mans	Lille	Lyon	Macon	Marseille	Montélimar	Nancy	Nantes	Nice	Nîmes	Orléans	Paris	Pau	Perpignan	Poitiers	Reims	Rennes	Saint-Dizier	Strasbourg	Toulouse
T _{BH} (°C)	-14	-5	-5	-4	-7	-8	-4	-7	-9	-8	-8	-5	-6	-11	-5	-2	-5	-7	-7	-5	-4	-7	-10	-5	-11	-14	-6
T _{DE} (°C)	31	29	32	25	26	31	31	30	28	32	31	34	33	29	31	32	35	30	30	32	31	30	30	28	29	30	32

Valeurs de T_{BH} et T_{BE} pour différentes villes.

3] Température de non-chauffage : T_{NC}

La température de non-chauffage T_{NC} dépend de l'isolation de l'habitation, et de la température d'ambiance souhaitée. Elle est d'environ de 14°C pour une habitation bien isolée (conductance thermique volumique de G=0,65 à 1W/m³.°C) pour une ambiance de 20°C. Pour une habitation d'isolation moyenne (G=2 à 3,5W/m³.°C), elle est de 16°C.

T_{NC} pour différentes températures de consigne



On trouve T_{NC} par la formule empirique :

$$T_{NC} = K \cdot \ln\left(\frac{G}{G_0}\right)$$

avec $K=3,1848$ et $G_0 = \frac{3}{\exp\left(\frac{T_c - 3}{3,1858}\right)}$, où T_c est la température de consigne en °C.

4] Les degrés-Jours Base de référence T_{NC} : $DJ_{T_{NC}}$

Les $DJ_{T_{NC}}$ sont calculés comme les DJU mais non pas par rapport à la température de 18°C mais par rapport à la température T_{NC} .

Pour la France, on peut utiliser la formule suivante :

$$DJ_{T_{NC}} = DJU - 225(18 - T_{NC})$$

où 225 représente le nombre de jours moyen de la période de chauffage.

5] Consommation annuelle d'une habitation : W_{an} .

La consommation annuelle d'une habitation dépend de son niveau d'isolation, de sa surface vitrée au sud (pour les apports gratuits d'énergie) et des pertes par ventilation (par la VNC, VMC).

On peut définir le coefficient G comme étant la conductance de pertes volumique intégrant la ventilation.

G est exprimé en W/m^3K .

Pour les constructions neuves, G est compris entre 0,65 et 1 W/m^3K .

Dans l'habitat ancien, G est compris entre 2 et 3,5 W/m^3K .

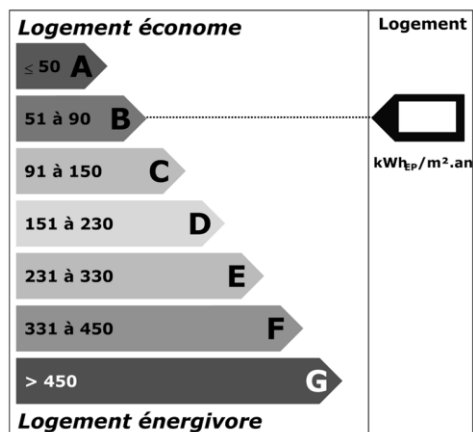
Ainsi W_{an} s'exprime par :

$$W_{an} = GV \cdot DJ_{T_{NC}} \cdot 24$$

où V représente le volume en m^3 de l'habitation.

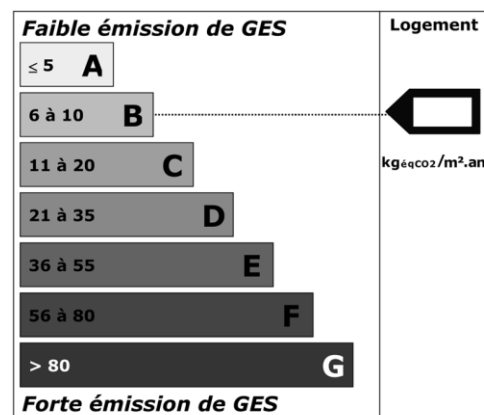
Consommations énergétiques
(en énergie primaire)
pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et le refroidissement, déduction faite de la production d'électricité à demeure

Consommation conventionnelle : $kWh_{EP}/m^2.an$



Émissions de gaz à effet de serre (GES)
pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et le refroidissement

Estimation des émissions : $kg_{\text{éqCO}_2}/m^2.an$



Parfois, la connaissance du coefficient G d'une habitation est difficile. Le diagnostic de performance énergétique d'une habitation permet d'attribuer un coefficient K_{DPE} allant de A à G permettant d'évaluer le niveau d'isolation thermique d'une habitation. Ce coefficient s'il est exprimé en kWh/m^2 sur un an peut être relié au coefficient G.

En effet, le volume d'une habitation est en général, la surface S en m^2 multipliée à la hauteur moyenne de plafond H (en m).

$$V = S \cdot H$$

Il faut introduire un coefficient C_{ep} de la RT2005, coefficient d'énergie primaire (ep) valant 1 pour les énergies primaires (gaz, fuel), 0,6 pour le bois et 2,58 pour l'électricité.

$$K_{DPE} = \frac{W_{consommée} \cdot C_{ep}}{S}$$

où $W_{consommée}$ représente l'énergie consommée pendant 1 an en kWh.

Remarques :

Pour les labels, le coefficient Cep pour le bois est inférieur à 1, ce qui donne un attrait supplémentaire à ce type d'énergies renouvelables.

En suisse, on définit un indice de dépense énergétique IDE en MJ/m² qui correspond au rapport entre la consommation totale de tous les équipements de l'habitation par la surface brute de celle-ci. Pour le label Minergie (équivalent suisse de BBC), le bâtiment doit être inférieur à 169MJ/m², ce qui correspond à 44kWh/m² en énergie finale.

Cas d'une chaudière classique :

Dans le cas où l'énergie consommée est simplement celle du chauffage, et dans le cas où ce dernier est créé par une chaudière (fuel, gaz, bois ou électrique) de rendement η , alors :

$$W_{\text{consommée}} = \frac{W_{\text{an}}}{\eta}$$

On a donc :

$$K_{\text{DPE}} = \frac{G}{\eta} \cdot H \cdot DJ_{\text{T}_{\text{NC}}} \cdot 24 \cdot \text{Cep} \quad \text{où } K_{\text{DPE}} \text{ exprimé en Wh.ep/m}^2.$$

$$K_{\text{DPE}} = \frac{G}{\eta} \cdot H \cdot DJ_{\text{T}_{\text{NC}}} \cdot 0,024 \cdot \text{Cep} \quad \text{où } K_{\text{DPE}} \text{ exprimé en kWh.ep/m}^2.$$

Cas d'une PAC : il faut additionner la consommation de l'appoint éventuel et celle consommée par le compresseur de la PAC

6] Dimensionnement de l'organe de chauffage.

Les déperditions thermiques P (en W) résultantes de l'isolation et de la ventilation sont :

$$P = G \cdot V \cdot (T_C - T_B)$$

On peut trouver dans les notices d'installateurs, le coefficient que nous appellerons g (ou déperdition volumique dépendant de l'habitation et du lieu de celle-ci) donné en W/m³ pour ne pas confondre avec G donné en W/K.m³.

La relation entre les 2 est donc :

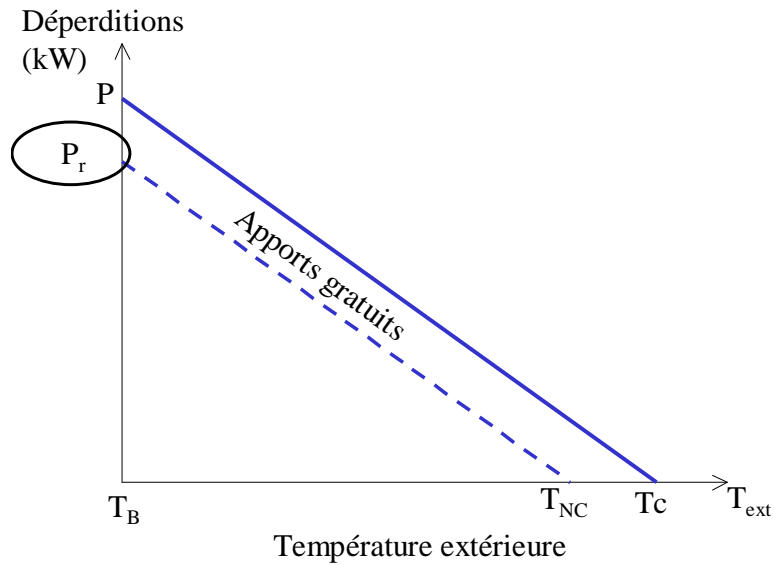
$$g = G \cdot (T_C - T_B)$$

On trouve alors une relation simple :

$$P = g \cdot V$$

Exemple : pour Lille, T_B=-9C, prenons T_C=19°C :

G (W/Km ³)	0,65	1	2	3,5
g (W/m ³)	18,2	28	56	98



Avec les apports externes et internes, on peut obtenir la puissance réelle (calorifique) P_r à installer pour que la maison soit chauffée à T_c lorsqu'à l'extérieur $T_{ext}=T_B$.

$$P_r = P \left(\frac{T_{NC} - T_B}{T_c - T_B} \right)$$

Ainsi on peut trouver la consommation annuelle par :

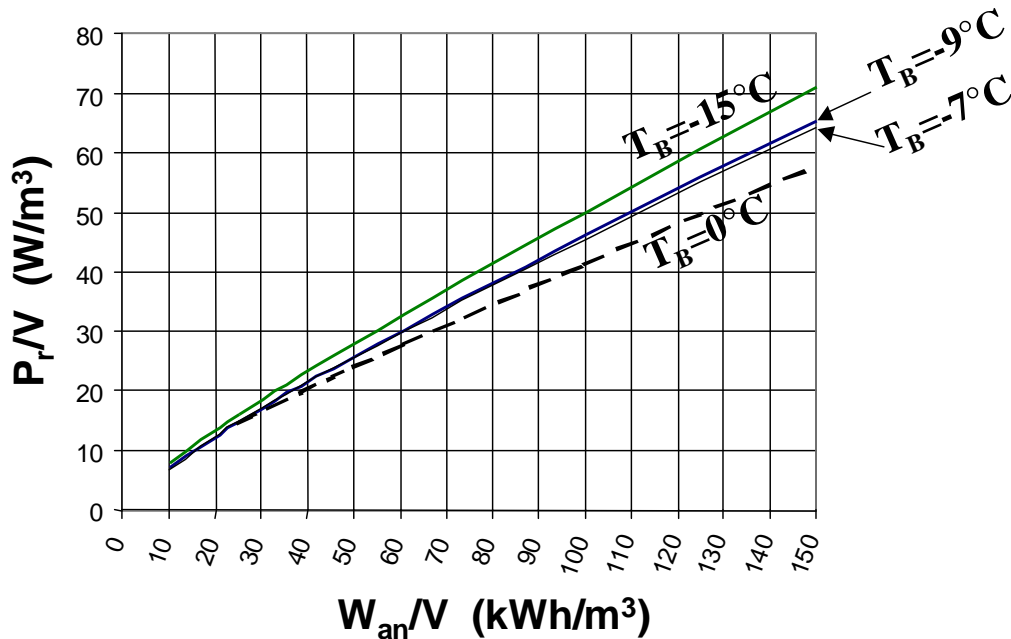
$$W_{an} = \frac{P_r}{T_{NC} - T_B} \cdot DJ_{T_{NC}} \cdot 24$$

Remarque :

Dans le cas où les besoins thermiques annuelles sont connues (W_{an}), ce qui peut être le cas où les occupants du logement ont des factures énergétiques depuis des années et que le rendement de la chaudière est connu, il est alors possible de déterminer P_r . Pour cela nous utilisons le graphique suivant de P_r/V (W/m^3) en fonction de W_{an}/V (kWh/m^3) où V représente le volume total à chauffé.

Notons que plus T_B est bas, et plus P_r doit être grand.

Dimensionnement de la puissance thermique maximale volumique en fonction de la consommation annuelle volumique



7] Taux d'utilisation de l'organe de chauffage.

On peut définir un taux d'utilisation de l'organe de chauffage τ que l'on peut exprimer en %. Ce taux correspond au rapport entre l'énergie annuelle consommée W_{an} et l'énergie théorique maximale W_{max} si l'organe de chauffage serait utilisé à plein régime P_r toute l'année.

Ainsi :

$$\tau = \frac{W_{an}}{W_{max i}}$$

On a aussi :

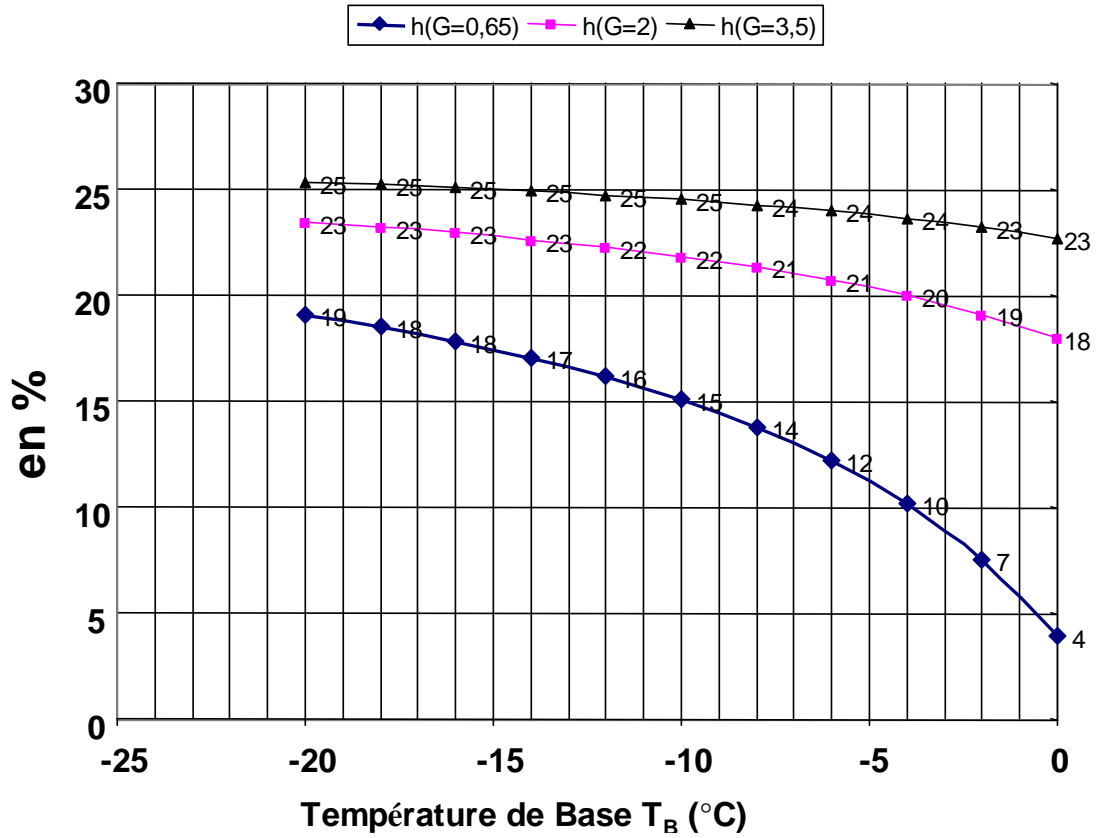
$$W_{max i} = P_r \cdot 365 \cdot 24 = 8760 \cdot P_r \quad \text{où } P_r \text{ est donnée en W et } W_{max i} \text{ en Wh.}$$

De la même façon, si on veut connaître le temps h (en heures) d'utilisation équivalent au régime nominal P_r , il suffit de multiplier τ par 8760.

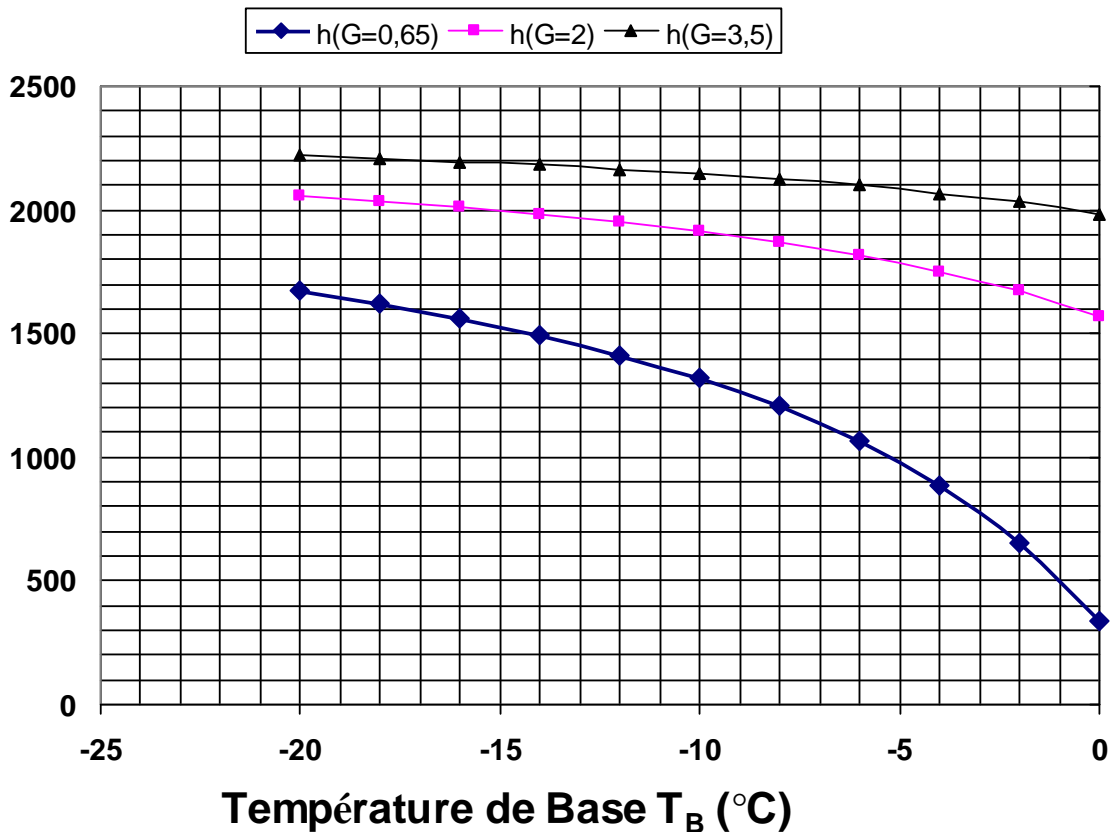
h est dépendant de la conductivité thermique G du bâtiment puisqu'il est fonction de T_{NC} .

En reprenant toutes les formules de ce cours, τ et h sont tracés respectivement sur les 2 diagrammes suivants en fonction de la température de base T_B et pour 3 types de bâtiments ($G=0,65$; $G=2$ et $G=3,5$). Ces courbes ont été tracées pour une température de consigne $T_C=19^\circ\text{C}$.

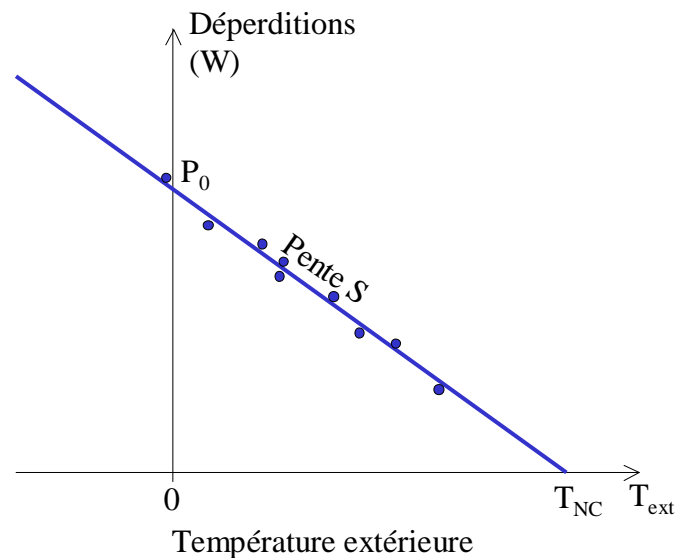
τ en % d'utilisation au régime nominal



h (en heures équivalentes d'utilisation au régime nominal)



8] Diagnostic par la signature thermique d'une habitation.



Il est possible de diagnostiquer un logement par des mesures ponctuelles de consommation de chauffage journalière, voire même horaire. Pour cela il faut se trouver dans des conditions particulières :

- la température de consigne T_C doit rester constante pendant l'essai,
- les conditions météorologiques doivent être nuageuses, sans pluie, et avec un vent faible pour ne pas être perturbé par les apports externes,
- l'habitation aura été chauffée au préalable à la même température de consigne,
- la température extérieure est une valeur moyenne sur la période de mesure.

La consommation C en Wh relevée pendant la période T permet de connaître les déperditions D en Watts par $D=C/T$.

Lorsque plusieurs essais ont été relevés, une droite de régression est tracée dans le nuage de points, dont l'équation est :

$$D=P_0-S.T_{ext}$$

La pente S (en W/K) est appelée signature énergétique. Sa valeur est d'autant plus grande que le bâtiment est énergivore.

Une fois que l'équation est connue, il est possible de connaître les besoins annuels de chauffage $W_{consommée}$ du logement par :

$$W_{consommée} = (P_0 - S \cdot \langle T_{ext} \rangle) \cdot 24 \cdot J_{ch}$$

$$\text{soit } W_{consommée} = \left(P_0 - S \cdot \left(\langle T_C \rangle - \frac{DJU}{J_{ch}} \right) \right) \cdot 24 \cdot J_{ch}$$

J_{ch} : nombre de jours de chauffage (=225)

$\langle T_{ext} \rangle$: température extérieure moyenne pendant la saison de chauffe

$\langle T_C \rangle$: température moyenne de consigne de chauffage

DJU : nombre de degrés-jours durant la période de chauffage.

En reprenant les relations précédentes, nous avons alors :

$$\eta W_{\text{consommée}} = G V \cdot DJ_{T_{NC}}^{24}$$

T_{NC} est obtenue par P_0/S , ainsi on détermine $DJ_{T_{NC}}$. La conductance G peut alors se calculer par :

$$G = \frac{\eta W_{\text{consommée}}}{V \cdot DJ_{T_{NC}}^{24}}$$

9] Exemple : consommation d'une maison sur Lille.

La maison de construction pas trop ancienne possède une surface habitable de 100 m^2 avec une hauteur de plafond de $2,50 \text{ m}$. Le coefficient G de l'habitation est de $G=1,25$. Donner le coefficient K_{DPE} .

Par exemple : à Lille, $T_B = -9^\circ\text{C}$.

La valeur du DJU donnée par la station météorologique est 2693 (donnée par Promotelec); en utilisant la formule, on trouve : 2608 soit un écart de 3% .

On trouve $T_{NC} = 13,2^\circ\text{C}$.

Et donc on a $DJ_{T_{NC}} = 1530$.

Le temps d'utilisation équivalente h à pleine puissance est alors 1653 heures avec un taux d'utilisation de 19% .

Avec une température de consigne de 19°C , on trouve que la puissance thermique de chauffage doit être de $P = 8,75 \text{ kW}$.

Les besoins annuels de chauffage s'élèvent à 11476 kWh .

Les chaudières sont dimensionnées beaucoup plus grandes pour satisfaire les besoins d'ECS en même temps que le chauffage.

Il faut, pour choisir une chaudière, diviser P par le rendement. Dans le cas du chauffage électrique, le rendement est de 100% . Le coefficient C_{ep} est de $2,58$.

On a alors K_{DPE} de 296 kWh/m^2 soit un classement de performance énergétique en classe E.

Si la chaudière était au gaz et de rendement de 85% , alors K_{DPE} de 135 kWh/m^2 soit un classement de performance énergétique de C.

De plus, la régulation de la chaudière devient un élément permettant d'augmenter l'efficacité de celle-ci. Les anciens systèmes se régulaient en Tout ou Rien (TOR), il y avait de nombreuses pertes supplémentaires pendant la période de mi-saison. Les nouveaux systèmes s'adaptent la puissance de chauffe au nouveau besoin, ainsi l'eau dans les canalisations est plus basse en mi-saison et donc les pertes sont moins importantes.

On voudrait installer une PAC air-eau en plus de la chaudière existante. La PAC s'arrête en dessous de -4°C . Déterminer le taux de non-fonctionnement de la PAC pendant la période de chauffe.

Grâce à l'isolation et l'inertie de l'habitation, la période de chauffe est réduite, elle n'est plus de 100%

mais de $\tau_{chauffe} : \int_{T_B}^{T_{NC}} f(T_{ext}) dT_{ext} = \tau_{chauffe}$, on trouve 99,5%. On gagne 1 à 2 jours de chauffe sur la période entière.

Le taux de non-fonctionnement de la PAC est $\int_{T_B}^{T_{min}} f(T_{ext}) dT_{ext}$ soit 3,7% soit à peu près 9 jours sur une période de chauffe de 225 jours. On doit utiliser un appoint seul pendant cette période.

10] A vous maintenant

Calculer le $U_{BAT\ Réf}$ de votre logement (voir cours de l'énergétique de l'habitat de la Licence Génie énergétique – énergies renouvelables de la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune). En déduire le GV de votre logement en tenant compte des pertes par le renouvellement d'air.

Donner W_{an} , puis P. En déduire K_{DPE} .

Références :

Chauffage par Pompe à Chaleur – Jacques Bernier. Editions PYC Livres. 2007

Mémotech – génie énergétique – P.Dal Zotto, J-M. Larre, A. Merlet, L. Picau. CASTEILLA, 2009.

<http://www.logement.gouv.fr>

http://elektor.presse.free.fr/fiches_livres/170_NRJ_Guiheneuf/bf1170_fiche.html

(*) <http://foad.univ-artois.fr/moodle/course/view.php?id=247>

(**) <http://foad.univ-artois.fr/moodle/course/view.php?id=292>

(***) <http://foad.univ-artois.fr/moodle/course/view.php?id=252>

à propos des auteurs :

(*)(***) Vincent F.A. Molcrette, docteur, ingénieur ISEN, agrégé de génie électrique, ultramarathonien.

(**) Vincent Autier, Maître de Conférences en génie électrique, ceinture noire jujitsu.

Co-responsables de la licence Génie énergétique - énergies renouvelables

Faculté des Sciences Appliquées, Béthune, Université d'Artois.

