

## Module Quartier Durable

### Niveau 2 : Approfondissements thématiques – Thème « Energie et Changement climatique »

Nous vous proposons 4 exercices pour que vous vous appropriiez les leviers permettant de limiter la consommation d'énergie dans les bâtiments.

Exercice 1 : par l'orientation du bâtiment et l'augmentation des surfaces vitrées.

Exercice 2 : par l'amélioration de l'isolation (surfaces vitrées)

Exercice 3 : par l'amélioration de l'isolation (parois opaques)

Exercice 4 : par la production d'énergie locale et renouvelable

### Exercice 1 : l'orientation du bâtiment et l'augmentation des surfaces vitrées

Une maison d'une seule pièce de 10 mètres sur 10 mètres.

La hauteur des murs est de 2,5 mètres. La toiture est une toiture terrasse.

L'un des murs est percé d'une porte (1x2,1 m) et l'un des autres murs est percé de deux fenêtres (2x1,2 m chacune).

La consommation d'énergie globale du bâtiment au sens de la RT2005, est de 144 kWh/an/m<sup>2</sup>.

Il s'agit d'un exemple destiné à donner un ordre de grandeur des différents postes de consommation d'une maison, et de l'impact de différentes techniques permettant de limiter cette consommation.

La maison a deux fenêtres de 1,20 mètre sur 2 mètres sur sa façade nord.

Les apports d'énergie solaire ont été calculés comme les gains d'énergie liés à l'ensoleillement global de ces surfaces vitrées durant la période de chauffage.

Les apports d'énergie solaire ont été calculés suivant la formule suivante :

$$A_e = R_s \cdot Y \cdot F_s \cdot S$$

Avec :

- $A_e$  (kWh/an) : les apports d'énergie solaire par les surfaces vitrées pendant un an
- $R_s$  (kWh/m<sup>2</sup>/an) : le rayonnement solaire annuel global à Paris cumulé durant les mois d'octobre à avril, sur un plan vertical dirigé vers le nord. Valeur : 160 kWh/m<sup>2</sup>/an (logiciel CALSOL, INES)
- $Y$  : un coefficient de correction permettant de prendre en compte le châssis des fenêtres. Valeur : 0,95
- $F_s$  : facteur solaire, correspondant à la part de l'énergie reçue à l'intérieur du bâtiment par rapport à l'énergie solaire à l'extérieur de la paroi vitrée. Il dépend des caractéristiques des vitres. Valeur : 0,65 (double vitrage avec lame d'argon).
- $S$  : Surface du vitrage. Valeur :  $2 \times 2 \times 1,2 = 4,8$  m<sup>2</sup>.

L'apport d'énergie solaire est bien égal à :  $A_e = 160 \times 0,95 \times 0,65 \times 4,8 = 474$  kWh/an

<i>Bilan thermique (calcul des besoins de chauffage)</i>	
+ Apports solaires	474 kWh/an
+ Apports internes (habitants, mobilier, électroménager)	639 kWh/an
- Pertes de chaleur par les parois	10150 kWh/an
- Pertes liées à la ventilation et la perméabilité à l'air	401 kWh/an
<b>Besoins de chauffage</b>	<b>9438 kWh/an</b>
avec une chaudière à gaz de rendement 90%	
<b>a Consommation d'énergie primaire pour le chauffage</b>	<b>105 kWh/an/m<sup>2</sup></b>
Consommation d'énergie finale annuelle pour l'eau chaude sanitaire	
	3000 kWh/an
avec une chaudière à gaz de rendement 90% :	
<b>b Consommation d'énergie primaire pour l'eau chaude sanitaire</b>	<b>33,3 kWh/an/m<sup>2</sup></b>
Consommation d'énergie finale annuelle pour l'électricité	
	2400 kWh/an
dont éclairage	
	240 kWh/an
avec un taux conventionnel de 2,58 kWh d'énergie primaire pour 1 kWh d'énergie finale :	
<b>f Consommation d'énergie primaire totale pour l'électricité</b>	<b>62 kWh/an/m<sup>2</sup></b>
<b>c Consommation d'énergie primaire pour l'éclairage</b>	<b>6 kWh/an/m<sup>2</sup></b>
d Energie primaire pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire apportée par une énergie renouvelable	
	0 kWh/an/m <sup>2</sup>
e Production d'électricité par une source d'énergie renouvelable	
	0 kWh/an/m <sup>2</sup>
<b>Consommation d'énergie primaire globale du bâtiment*</b>	
<b>= a+b+c-d-e</b>	<b>144 kWh/an/m<sup>2</sup></b>
<i>Consommation d'énergie primaire globale réelle (total électricité)</i>	
<b>= a+b+f-d-e</b>	<b>200 kWh/an/m<sup>2</sup></b>

1. Calculer les apports d'énergie solaire :

- Avec deux fenêtres supplémentaires de même dimension sur la façade nord.
- Avec uniquement quatre fenêtres de même dimension, en orientant la maison de façon à ce qu'elles soient situées sur la façade sud, sachant que le rayonnement solaire global durant la période de chauffage sur un plan vertical orienté au sud à Paris est de 387 kWh/m<sup>2</sup>/an (données CALSOL)
- Avec quatre fenêtres de mêmes dimensions sur la façade sud et deux sur la façade nord.
- 

2. Dans le cas de la question 1. c), en considérant que les autres éléments du bilan thermique de la maison ne sont pas modifiés, quels sont les besoins de chauffage ? la consommation d'énergie primaire pour le chauffage (rendement = 90%\*) en kWh/an/m<sup>2</sup> ? la consommation d'énergie primaire globale du bâtiment en kWh/an/m<sup>2</sup> ?

\*Une chaudière d'un rendement de 90% consomme 1 kWh d'énergie primaire pour produire une énergie de 0,90 kWh sous forme de chaleur

**Corrigez/complétez le bilan proposé avec vos résultats (voir dernière page)**

## Exercice 2 : l'amélioration de l'isolation (surfaces vitrées)

Les déperditions d'énergie d'un bâtiment correspondent essentiellement à des flux de transmission de chaleur traversant les parois, sur l'ensemble de leurs surfaces, et aux jointures entre deux parois (ponts thermiques). Les flux de pertes de chaleur par les parois ont été calculés suivant la formule suivante :

$D = U \cdot \Delta T \cdot S$  avec :

- S (m<sup>2</sup>) : La surface de la paroi. Pour les liaisons entre parois, on a pris la longueur de l'arête entre les deux parois.
- $\Delta T$  (K ou °C) : différence de température entre l'extérieur et l'intérieur d'une paroi. Par hypothèse, on considère une température extérieure moyenne de 7°C durant une période de chauffe de 222 jours (en Ile-de-France) et une température intérieure désirée de 19°C.  $\Delta T = 19 - 7 = 12^\circ\text{C}$ .
- U (W/m<sup>2</sup>.K) : le coefficient de transfert thermique indique la facilité avec laquelle l'énergie thermique est transmise par une surface d'échange. Le coefficient U est l'inverse de la résistance thermique R (m<sup>2</sup>.K/W), qui mesure le pouvoir d'isolation thermique d'une paroi. Les valeurs U retenues ici sont les valeurs de référence de la RT2005 pour la région climatique à laquelle appartient l'Ile-de-France (voir tableau).
- D : les déperditions thermiques à travers les parois totales en W. Ces flux peuvent aussi s'exprimer en Wh. Pour obtenir les déperditions annuelles, c'est-à-dire durant la période de chauffe, il faut multiplier la valeur totale obtenue par le nombre d'heures dans une journée et par le nombre de jours de chauffe.

On a donc : les pertes de chaleur totales par les parois =  $1904,95 \times 24 \times 222 = 10149573$  Wh/an, soit 10150 kWh/an.

Parois	U (W/m <sup>2</sup> .K)	? temp (K)	Surface (m <sup>2</sup> .m)	Déperdition thermique (Wh)
Murs	0,360	12	83,5	360,72
Toiture terrasse	0,27	12	100	324,00
plancher	0,27	12	100	324,00
Porte	1,5	12	2,1	37,80
Fenêtres	0,5	12	14,4	86,40
Liaison mur/plancher bas	0,4	12	40	192,00
Liaison mur/plancher intermédiaire	0,55	12	40	264,00
Liaison mur/toiture terrasse	0,5	12	40	240,00
Total				1828,92

- Les déperditions thermiques liées aux surfaces vitrées et aux murs ont été calculées pour 2 fenêtres de 2x1,2 mètres. Recalculez les déperditions thermiques annuelles en prenant en compte les 6 fenêtres de l'exercice 1. Comment les déperditions thermiques totales sont-elles modifiées ? Comment l'expliquer ?
- Refaites le calcul du 1. a), avec des fenêtres (vitrages et cadres) très performantes, dont le coefficient U=0,5 W/m<sup>2</sup>.K. Comparer le besoin de chauffage avec ce qu'il était en considérant 2 fenêtres double vitrage standard sur la façade nord (9438 kWh/an). Comment l'expliquer ?

**Corrigez/complétez le bilan proposé dans l'exercice 1 avec vos résultats (voir dernière page)**

## Exercice 3 : l'amélioration de l'isolation (parois opaques)

RAPPELS :

Les flux de pertes de chaleur par les parois ont été calculés suivant la formule suivante :  $D = U \cdot \Delta T \cdot S$  avec :

- $S$  (m<sup>2</sup>) : La surface de la paroi.
- $\Delta T$  (K ou °C) : différence de température entre l'extérieur et l'intérieur d'une paroi. Par hypothèse,  $\Delta T = 12^\circ\text{C}$ .
- $U$  (W/m<sup>2</sup>.K) : le coefficient de transfert thermique indique la facilité avec laquelle l'énergie thermique est transmise par une surface d'échange.
- Le coefficient  $U$  est l'inverse de la résistance thermique  $R$  (m<sup>2</sup>.K/W), qui mesure le pouvoir d'isolation thermique d'une paroi :  $U = 1/R$ .

La résistance thermique d'une paroi plane composée de 3 matériaux (1,2 et 3), sans espace entre eux, se calcule ainsi :  $R = 1/h_i + e_1/\lambda_1 + e_2/\lambda_2 + e_3/\lambda_3 + 1/h_e$  avec :

- $1/h_i$  et  $1/h_e$  : les coefficients de transferts thermiques superficiels interne et externe, qui permettent de prendre en compte les échanges thermiques superficiels de la paroi avec l'air à l'intérieur et à l'extérieur. Valeur : on prendra  $1/h_i + 1/h_e = 0,17$  m<sup>2</sup>.K/W en (m) : l'épaisseur de la couche de matériau  $n=1,2$ , ou 3.
- $\lambda_n$  (W/m.K) : la conductivité thermique du matériau  $n=1, 2$ , ou 3.

	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)
Bloc béton (parpaings)	0,952
Mousse de polyuréthane	0,029
Panneau contreplaqué	0,1
Enduit ciment	0,8
Enduit terre	0,635
Paille	0,05
Bois léger étuvé et poncé	0,14

Parois	U (W/m <sup>2</sup> .K)	? temp (K)	Surface (m <sup>2</sup> .m)	Déperdition thermique (Wh)
Murs	0,360	12	83,5	360,72
Toiture terrasse	0,27	12	100	324,00
plancher	0,27	12	100	324,00
Porte	1,5	12	2,1	37,80
Fenêtres	0,5	12	14,4	86,40
Liaison mur/plancher bas	0,4	12	40	192,00
Liaison mur/plancher intermédiaire	0,55	12	40	264,00
Liaison mur/toiture terrasse	0,5	12	40	240,00
Total				1828,92

- a) \* Calculer le coefficient  $U$  des murs, s'ils étaient composés d'un panneau de contreplaqué d'1 cm d'épaisseur, d'une couche de polyuréthane (isolant) de 10 cm de parpaings de 17,5 cm d'épaisseur, et d'une couche d'enduit en ciment de 2,5 cm d'épaisseur. Calculer les déperditions thermiques à travers les murs dans ce cas.
- \* Refaire le calcul 1. a) avec une couche de polyuréthane de 20 cm.
- b) Calculer le coefficient  $U$  des murs, s'ils étaient composés d'une couche d'enduit en terre de 3 cm, de bottes de paille d'une largeur de 33 cm et d'un habillage en bois de 5 cm d'épaisseur. Comparer avec le coefficient  $U$  obtenu dans la question 1 b).
- c) Conserver la valeur trouvée dans la question 1. b) pour le coefficient  $U$  des murs. Une amélioration comparable des propriétés isolantes des autres parois et liaisons permet de diviser leur coefficient  $U$  par 2 (à l'exception de la porte et des fenêtres). Calculer les pertes de chaleur par les parois, et en déduire la consommation d'énergie primaire globale du bâtiment.

Corrigez/complétez le bilan proposé dans l'exercice 1 avec vos résultats (voir dernière page)

## Exercice 4 : production d'énergie locale et renouvelable

Après l'amélioration de l'orientation de la maison, augmentation des surfaces vitrées, et l'amélioration de l'isolation des fenêtres et des parois opaques, le bilan des consommations d'énergie primaire globales donne un chiffre de 53 kWh/an/m<sup>2</sup>, proche de la norme « bâtiment à basse consommation » (BBC).

- Calculer la consommation d'énergie primaire pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire, et en déduire la consommation d'énergie primaire globale du bâtiment, avec :
  - une chaudière à gaz à condensation, dont le rendement est de 105%. Pour produire 1 kWh de chaleur dans la maison, elle utilise  $1/1,05=0,95$  kWh d'énergie primaire.
  - une pompe à chaleur géothermique de coefficient de performance (COP) = 5, et dont le compresseur est entraîné par un moteur électrique. Pour produire 1 kWh de chaleur, elle utilise  $1/5=0,20$  kWh d'énergie électrique. Attention : 2,58 kWh d'énergie primaire sont nécessaires pour un kWh d'énergie électrique finale.
- La moitié de l'énergie nécessaire au chauffage et à l'eau chaude sanitaire est fournie par la pompe géothermique de la question 1. b). Le reste de l'énergie nécessaire pour ces usages est fourni par une chaudière solaire alimentée par des panneaux posés sur le toit.
  - Calculer la consommation d'énergie primaire totale pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage, couvrant la part assumée par la pompe à chaleur et le reste des besoins à couvrir par le chauffage solaire.
  - Calculer la surface nécessaire de panneaux solaires nécessaires à couvrir ces besoins, sachant que l'énergie finale sous forme de chaleur produite par des panneaux sur un plan horizontal à Paris est de 516 kWh/an par m<sup>2</sup> de panneaux (logiciel CALSOL).
- Une surface de 10 m<sup>2</sup> de panneaux solaires photovoltaïques disposés sur un plan horizontal à Paris permet de produire environ 1000 kWh/an d'énergie électrique (logiciel CALSOL). En comptant cet apport, et avec les technologies retenues à la question 2 b) pour le chauffage et l'eau chaude solaire, calculer la consommation d'énergie primaire globale du bâtiment.

Corrigez/complétez le bilan proposé ci-dessous avec vos résultats

<i>Bilan thermique (calcul des besoins de chauffage)</i>	
+ Apports solaires	kWh/an
+ Apports internes (habitants, mobilier, électroménager)	kWh/an
- Pertes de chaleur par les parois	kWh/an
- Pertes liées à la ventilation et la perméabilité à l'air	kWh/an
<hr/> Besoins de chauffage	<hr/> kWh/an
avec une chaudière à gaz de rendement 90%	
a Consommation d'énergie primaire pour le chauffage	kWh/an/m <sup>2</sup>
Consommation d'énergie finale annuelle pour l'eau chaude sanitaire	kWh/an
avec une chaudière à gaz de rendement 90% :	
b Consommation d'énergie primaire pour l'eau chaude sanitaire	kWh/an/m <sup>2</sup>
Consommation d'énergie finale annuelle pour l'électricité	kWh/an
dont éclairage	kWh/an
avec un taux conventionnel de 258 kWh d'énergie primaire pour 1 kWh d'énergie finale :	
f Consommation d'énergie primaire totale pour l'électricité	kWh/an/m <sup>2</sup>
c Consommation d'énergie primaire pour l'éclairage	kWh/an/m <sup>2</sup>
d Energie primaire pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire apportée par une énergie renouvelable	kWh/an/m <sup>2</sup>
e Production d'électricité par une source d'énergie renouvelable	kWh/an/m <sup>2</sup>
Consommation d'énergie primaire globale du bâtiment*	
=a+b+c-d-e	kWh/an/m <sup>2</sup>
<i>Consommation d'énergie primaire globale réelle (total électricité)</i>	
=a+b+f-d-e	kWh/an/m <sup>2</sup>