

# Notes techniques et réflexions

## Quelques réalités sur « l'effet rebond » lors de la rénovation des bâtiments

**Auteur : Olivier SIDLER**

**Mai 2024**

*Consultant en énergétique*  
26160 FELINES S/RIMANDOULE  
*email : olivier.sidler@posteo.net*

## Quelques réalités sur « l'effet rebond » lors de la rénovation des bâtiments

### Résumé

L'effet rebond consécutif à une augmentation de la température des logements après rénovation est souvent évoqué dans de nombreuses études comme l'explication principale des écarts de consommation considérables constatés entre une « prévision » et la réalité. L'étude qui suit montre qu'il faudra trouver d'autres explications moins simplistes à ces écarts car **la surconsommation due à l'effet rebond résultant d'une augmentation de température intérieure ne dépend que du niveau de la consommation spécifique d'énergie utile ( $\text{kWh}_{\text{eu}}/\text{m}^2/\text{an}$ ) d'un bâtiment après rénovation, et qu'elle est d'autant plus faible que ce niveau est bas**. En conséquence, plus l'amélioration énergétique ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ ) de la rénovation est importante, plus la valeur relative de l'effet rebond rapportée à l'économie d'énergie est faible, voire peu significative. Ceci met en garde contre les « petites rénovations » qui seront beaucoup plus affectées par l'effet rebond, notamment toutes les rénovations dites « par étapes » ou les simples gestes.

La surconsommation induite varie (pour  $1^\circ\text{C}$  d'augmentation de la température intérieure) de  $5 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$  pour une rénovation très performante (soit  $0,35$  à  $1,2 \text{ €/m}^2/\text{an}$  selon l'énergie) à  $13 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$  pour un bâtiment très peu rénové consommant  $150 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$  (soit  $0,9$  à  $3,0 \text{ €/m}^2/\text{an}$  selon l'énergie), ce qui est relativement faible. **La mise en œuvre d'une pompe à chaleur, précédée ou non d'une rénovation, minimise encore ces surconsommations** qui varient alors de  $1$  à  $6 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$  d'électricité (pour  $1^\circ\text{C}$  d'augmentation de la température intérieure), les valeurs les plus faibles correspondant aux opérations avec rénovation préalable à l'installation d'une PAC (donc des coûts variant de  $0,25$  à  $1,5 \text{ €/m}^2/\text{an}$ ).

Enfin, toutes les campagnes de mesure menées par le bureau d'études Enertech ont montré que dans la très grande majorité des cas de rénovation, même partielle, la température après rénovation n'était pas différente de celle avant rénovation.

## INTRODUCTION

De nombreuses études sur les bilans d'opérations après rénovation constatent que le résultat observé, est dégradé par rapport à ce qui était « prévu » et attribuent cette dégradation à l'effet rebond. L'étude du CAE sur le DPE<sup>1</sup> attribue même à l'effet rebond (intitulé « l'effet comportemental ») les deux tiers de l'écart considérable calculé entre consommations réelle et théorique (celle-ci étant 6,5 supérieure à la première), alors qu'il n'y a même pas eu de travaux (il semble donc difficile dans ce cas de parler d'effet rebond)....

L'effet rebond, comme son nom le suggère, est un mécanisme qui n'existe que par rapport à un fait générateur, la plupart du temps des travaux d'amélioration de la performance énergétique d'un logement pour ce qui nous concerne. Il s'agit, dans ce cas précis, de toutes les consommations d'énergie supplémentaires consécutives à cette amélioration. La première de ces consommations à laquelle on pense est bien sûr celle qui est due à l'augmentation de la température intérieure de consigne : puisque mon logement est désormais économe, cela ne va pas me coûter très cher de me chauffer à une température plus élevée qu'auparavant. Mais d'autres consommations induites, plus minimes, peuvent aussi exister. Celui qui a fait des économies sur son chauffage peut décider de partir une semaine au sport d'hiver. Il va donc dépenser de l'essence pour se rendre en station, utiliser des remonte-pentes, se chauffer, etc, toute chose qu'il pourra faire en partie grâce aux économies qu'il a réalisées sur le chauffage de son logement.

Nous ne nous intéresserons dans ce qui suit qu'aux dépenses énergétiques supplémentaires dans un logement après des travaux d'amélioration énergétique. Ces dépenses supplémentaires peuvent avoir pour origine essentiellement une augmentation de la température de consigne, et éventuellement, de façon plutôt marginale, une consommation d'eau chaude un peu supérieure. Nous allons nous concentrer sur l'impact réel d'une augmentation de la température de consigne de 1°C.

La question de l'économie consécutive à une variation de température, en-dehors de toute rénovation, est un thème récurrent de débat. Cette économie n'est pas toujours de 7% comme on le lit souvent et comme nous l'avons montré dans une note récente<sup>2</sup>.

On démontre facilement<sup>3</sup> que la variation de la consommation d'énergie utile (celle qui traverse les parois du logement et qui est nécessaire au renouvellement d'air) est égale à la variation de la consommation d'énergie finale (celle qui est livrée à l'entrée du logement et que l'on paye) pour une variation de la température de consigne (quelques degrés) et peut s'écrire :

$$\Delta e_u / e_u = (\Delta N_h / N_{hT_0}) / (1 - a / (d \cdot N_{hT_0})) \quad (1)$$

où :

- $e_u$  : consommation spécifique d'énergie utile de chauffage (kWh/m<sup>2</sup>/an) - Rappelons que  $e_u = e_f \cdot \eta_{gl}$  où  $\eta_{gl}$  est le rendement global de l'installation de chauffage, et  $e_f$  la consommation spécifique d'énergie finale de chauffage (kWh/m<sup>2</sup>/an)
- $N_{hT_0}$  : nombre de degrés.heures correspondant à la température de consigne  $T_0$  avant variation de celle-ci,

<sup>1</sup> <https://www.cae-eco.fr/staticfiles/pdf/focus-103-dpe-230110.pdf>

<sup>2</sup> <https://www.enertech.fr/quelle-economie-pour-1c-de-moins/>

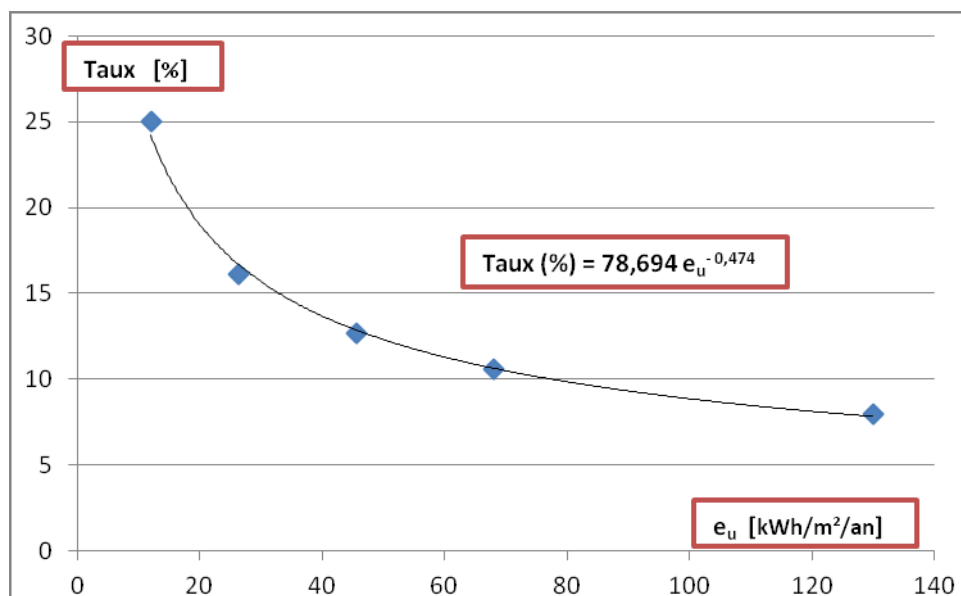
- $\Delta N_{hT0}$  : variation du nombre de degrés.heures consécutive à la variation  $\Delta T$  de la température de consigne
- $a$  : apports gratuits récupérés (solaires, internes, etc) [Wh/m<sup>2</sup>/an]
- $d$  : déperditions spécifiques totales [W/m<sup>2</sup>K]

La structure de cette expression montre que deux facteurs sont à l'origine de la variation de consommation :

- la **qualité thermique du logement**, caractérisée par les termes «  $d$  » et «  $a$  ». Plus le niveau de besoins en énergie utile d'un logement est faible (c'est-à-dire plus «  $d$  » est faible et le logement bien isolé), plus l'impact relatif d'une variation de 1°C de la température intérieure est important. Ceci s'explique par le rôle que jouent les apports de chaleur « gratuits » («  $a$  ») : plus le logement est isolé plus leur part dans l'équilibre thermique est importante,

- la **climatologie du lieu** qui détermine le nombre de degrés.heures en fonction de la température intérieure initiale  $T_0$  à partir de laquelle s'opère la variation de température. La note déjà citée<sup>4</sup> montre que plus la température intérieure de départ est élevée, moins importante sera la variation relative de la consommation.

Afin d'estimer l'impact d'un effet rebond, il faudrait donc théoriquement tenir compte de toutes ces spécificités propres à chaque logement et à chaque climat local. Mais afin de fixer des ordres de grandeur permettant de comprendre ce que peut représenter ou non cet effet rebond, on se base ici sur des valeurs moyennes de variations relatives des besoins en énergie utile obtenues lors d'études par simulation énergétique dynamique sur une grande variété de cas. On peut déduire de ces analyses l'évolution du taux de variation de la consommation (**T**) en fonction de la qualité thermique du logement caractérisée par l'énergie utile spécifique :



**Figure 1 : Taux de variation des besoins de chauffage (énergie utile spécifique) pour une augmentation de 1°C de la température intérieure, en fonction de la qualité thermique du bâtiment (énergie utile spécifique)**

<sup>3</sup> Voir en Annexe

<sup>4</sup> <https://www.enertech.fr/quelle-economie-pour-1c-de-moins/>

Quelle que soit la nature de l'énergie de chauffage (puisque  $e_u$  ne dépend que des pertes thermiques), ce taux (pour une variation de la température intérieure de 1°C) peut s'exprimer par la relation :

$$T (\%) = 78,694 \cdot e_u^{-0,474} \quad (2)$$

Avec  $e_u$  en kWh/m<sup>2</sup>/an.

Il est alors facile de déterminer pour tout logement défini par son énergie utile, voire par son énergie finale (si on connaît le rendement global de l'installation de chauffage), la valeur de la variation de besoins et de consommation due à une variation de température de 1°C.

## 1 – Variation relative de la consommation de chauffage pour 1°C de température supplémentaire

Il s'agit de répondre à la question récurrente de savoir quel est le pourcentage d'augmentation de la consommation d'énergie lorsque la température intérieure augmente de 1°C. La méthode la plus précise se réfère à l'énergie utile (car c'est elle qui définit les besoins et traduit la charge des pertes de l'enveloppe et de la ventilation du bâtiment qui sont les seules à déterminer cette variation), mais il faut pour cela connaître la consommation spécifique d'énergie finale et le rendement global de l'installation de chauffage. La consommation spécifique d'énergie utile vaut alors :

$$e_u = e_f \cdot \eta_{gl} \quad (3)$$

Le tableau de la figure 2 donne alors les valeurs T (en %) conformément à la relation (2) :

	Energie utile (kWh/m <sup>2</sup> /an)									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
<b>Effet Joule</b>										
% variation de	19,0	15,7	13,7	12,3	11,3	10,5	9,9	9,3	8,9	8,5
<b>l'énergie utile et de</b>	<b>120</b>	<b>130</b>	<b>140</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>170</b>	<b>180</b>	<b>190</b>	<b>200</b>	<b>210</b>
<b>l'énergie finale pour</b>	8,1	7,8	7,6	7,3	7,1	6,9	6,7	6,5	6,4	6,2
<b>un écart de 1°C de la</b>	<b>220</b>	<b>230</b>	<b>240</b>	<b>250</b>	<b>260</b>	<b>270</b>	<b>280</b>	<b>290</b>	<b>300</b>	<b>310</b>
<b>température intérieure</b>	6,1	6,0	5,9	5,7	5,6	5,5	5,4	5,4	5,3	5,2

*Figure 2 : Variation (en %) de l'énergie utile et de l'énergie finale spécifiques (kWh/m<sup>2</sup>/an) en fonction du niveau d'énergie utile spécifique pour un écart de 1°C de la température intérieure – Cas de l'effet Joule*

**Exemple :** quelle est la valeur relative de la surconsommation d'énergie due à une augmentation de température intérieure de 1°C dans un logement dont la consommation d'énergie finale, pour la température nominale de 19°C (avant élévation de 1°C) est de 60 kWh/m<sup>2</sup>/an et le rendement global de l'installation de chauffage de 70% ?

L'énergie utile vaut  $60 \times 0,70 = 42$  kWh/m<sup>2</sup>/an. Par interpolation le tableau de la figure 2 estime à 13,4% la surconsommation d'énergie utile et d'énergie finale due à 1°C supplémentaire de la température de consigne.

Mais on peut simplifier l'approche quand on ne connaît pas le rendement global si on considère que, de façon un peu grossière, pour un générateur à combustion, ce rendement est d'autant plus dégradé que la consommation spécifique d'énergie finale est importante.

Les valeurs observées d'expérience montrent qu'on peut le modéliser approximativement ainsi :

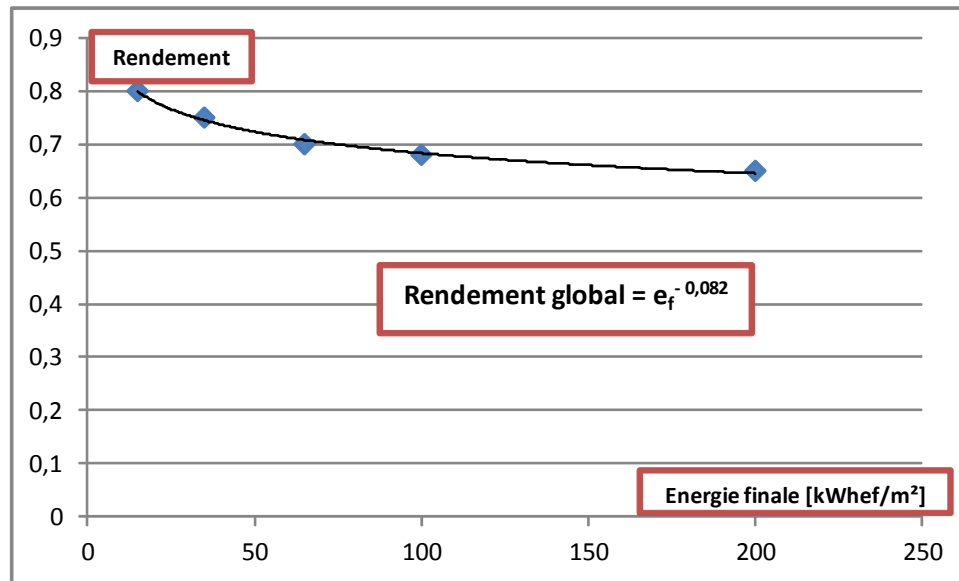


Figure 3 : Rendement global approché d'une installation de chauffage par combustion en fonction de l'énergie finale spécifique

Lorsque le générateur de chaleur est à base de combustible, l'expression du taux de variation de la consommation due à l'effet rebond s'écrit donc directement en fonction de l'énergie finale :

$$T (\%) = 78,694 \cdot e_f^{-0,435} \quad (4) \quad \text{générateur à combustible}$$

Mais lorsque la génération de chaleur est assurée par effet Joule, avec un rendement global supposé de 95%, l'expression de T se déduit des relations (2) et (3) :

$$T (\%) = 80,631 \cdot e_f^{-0,474} \quad (5) \quad \text{effet Joule}$$

Le tableau de la figure 4 fournit les valeurs de T pour des logements équipés de générateur de chaleur par combustible, calculées à partir de la relation (4) :

	Énergie finale (kWh/m²/an) <span style="float: right;">➔</span>									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Générateur à combustible										
% variation de	21,4	17,9	15,8	14,4	13,3	12,4	11,7	11,1	10,6	10,2
l'énergie utile et de	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
l'énergie finale pour	9,8	9,5	9,2	8,9	8,7	8,4	8,2	8,0	7,9	7,7
un écart de 1°C de la	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
température intérieure	7,5	7,4	7,3	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,6	6,5

Figure 4 : Variation (en %) de l'énergie utile et de l'énergie finale spécifiques (kWh/m²/an) en fonction du niveau d'énergie finale spécifique pour un écart de 1°C de la température intérieure – Cas des combustibles

**Exemple :** quelle est la valeur relative de la surconsommation d'énergie finale (ou d'énergie utile) due à une augmentation de température intérieure de 1°C dans un logement chauffé par combustible dont la consommation d'énergie finale, pour la température nominale de 19°C (donc avant élévation de 1°C) est de 60 kWh/m²/an ?

Sans connaissance du rendement global on utilise donc la méthode qui en a estimé la valeur approximative. Le résultat apparaît directement dans le tableau de la figure 4 : 13,3%.

Le tableau de la figure 5 fournit les valeurs de T pour des logements équipés de chauffage électrique par effet Joule, calculées à partir de la relation (5) :

	Energie finale (kWh <sub>ef</sub> /m <sup>2</sup> /an)									
Effet Joule	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
% variation de	19,5	16,1	14,0	12,6	11,6	10,8	10,1	9,6	9,1	8,7
l'énergie utile et de	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
l'énergie finale pour	8,3	8,0	7,7	7,5	7,3	7,1	6,9	6,7	6,5	6,4
un écart de 1°C de la	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
température intérieure	6,3	6,1	6,0	5,9	5,8	5,7	5,6	5,5	5,4	5,3

Figure 5 : Variation (en %) de l'énergie utile et de l'énergie finale spécifiques (kWh/m<sup>2</sup>/an) en fonction du niveau d'énergie finale spécifique pour un écart de 1°C de la température intérieure – Cas de l'effet Joule

## 2 – Augmentation de la consommation de chauffage (en kWh/m<sup>2</sup>/an) pour 1°C de température supplémentaire

Au §1 on a déterminé l'augmentation relative T(%) de la consommation (en énergie utile et en énergie finale) due à 1°C supplémentaire de la température de consigne. On peut alors immédiatement déduire que :

$$\Delta e_u = e_u \cdot T \quad (6)$$

$$\Delta e_f = e_f \cdot T \quad (7)$$

Dans l'exemple précédent (générateur à combustibles), une consommation d'énergie utile calculée de 42 kWh<sub>eu</sub>/m<sup>2</sup>/an a conduit à une valeur de T de 13,4%. Par voie de conséquence, la variation de la consommation d'énergie utile du logement après rénovation est de 0,134 x 42 = 5,6 kWh/m<sup>2</sup>/an, et celle d'énergie finale de 0,134 x 60 = 8,0 kWh/m<sup>2</sup>/an. Au lieu de consommer 42 kWh/m<sup>2</sup>/an d'énergie utile, le logement en consommera 47,6 kWh/m<sup>2</sup>/an et au lieu de consommer 60 kWh/m<sup>2</sup>/an d'énergie finale il en consommera 68,0.

### 3 - Expression de l'effet rebond en pourcentage de l'économie d'énergie utile ou finale initialement escomptée

Les paragraphes précédents ont permis de déterminer l'impact d'une variation de 1°C de la température de consigne sur une consommation de chauffage. Cette approche préalable était nécessaire pour permettre l'étude de l'effet rebond lors de travaux d'amélioration des performances d'un logement. **Car l'effet rebond induit par une augmentation de température de 1°C ne dépend que de l'état final après rénovation.** Il y a plusieurs manières de préciser l'importance de l'effet rebond selon la grandeur de référence. Ce paragraphe ne concerne pas les pompes à chaleur qui seront traitées au §4.

#### 3-1 Surconsommation d'énergie due à l'effet rebond

C'est la manière la plus simple et la plus importante de définir l'effet rebond : combien de kWh/m<sup>2</sup>/an représente-t-il ? Compte tenu du prix de l'énergie il sera facile d'en déduire son coût. Cette expression peut se faire en énergie utile ou en énergie finale, mais c'est bien cette dernière qui est la plus intéressante pour l'évaluation puisque c'est celle que l'on paye.

- Expression en énergie utile

La relation (6) couplée à la relation (2) permet d'écrire :

$$\Delta e_u = e_u \cdot 78,694/100 \cdot e_u^{-0,474} \quad \text{soit finalement :}$$

$$\Delta e_u = 0,78694 \cdot e_u^{0,526}$$

qui montre que **la surconsommation d'énergie utile due à l'effet rebond ne dépend QUE du niveau de l'énergie utile après travaux et qu'elle est d'autant plus importante que l'énergie utile après travaux est élevée (donc que la qualité de la rénovation est limitée).** Le tableau de la figure 6 fournit les surconsommations d'énergie utile dues à l'effet rebond en fonction de l'énergie utile atteinte (avant effet rebond) après travaux de rénovation :

eu	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
$\Delta e_u$	3,8	4,7	5,5	6,2	6,8	7,4	7,9	8,4	8,9	9,3	9,8	10,2	10,6	11,0
[kWh/m <sup>2</sup> /an]														

*Figure 6 : Surconsommation d'énergie utile spécifique  $\Delta e_u$  due à l'effet rebond en fonction de l'énergie utile spécifique de chauffage après travaux pour une variation de 1°C de la température intérieure (quelle que soit l'énergie de chauffage)*

- Expression en énergie finale

L'approche est identique. La relation (7) couplée à la relation (4) permet d'écrire pour les combustibles :

$$\Delta e_f = e_f \cdot 78,694/100 \cdot e_f^{-0,435} \quad \text{soit finalement :}$$

$$\Delta e_f = 0,78694 \cdot e_f^{0,565} \quad \text{pour les combustibles}$$

et couplée à la relation (5) elle fournit l'équivalent pour l'effet Joule :

$$\Delta e_f = 0,80631 \cdot e_f^{0,526} \quad \text{pour l'effet Joule}$$

qui confirme ce qui précède, à savoir que la surconsommation d'énergie finale due à l'effet rebond ne dépend elle aussi QUE du niveau de l'énergie finale après travaux et qu'elle est

d'autant plus importante que celle-ci est élevée (donc que la qualité de la rénovation est limitée). Le tableau de la figure 7 fournit la surconsommation d'énergie finale due à l'effet rebond en fonction de l'énergie finale atteinte (avant effet rebond) après travaux de rénovation :

Chauffage par :	ef	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Combustibles	$\Delta_{ef}$	4,3	5,4	6,3	7,2	8,0	8,7	9,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,3	12,8	13,3
Effet Joule	$\Delta_{ef}$	3,9	4,8	5,6	6,3	6,9	7,5	8,1	8,6	9,1	9,6	10,0	10,4	10,8	11,2
	[kWh/m <sup>2</sup> /an]														

**Figure 7 : Surconsommation d'énergie finale  $\Delta_{ef}$  due à l'effet rebond en fonction de l'énergie finale de chauffage après travaux pour une variation de 1°C de la température intérieure**

Ce dernier tableau est riche d'enseignement car il permet de déterminer le coût de l'effet rebond en fonction du niveau de consommation d'énergie finale atteint après rénovation (mais avant effet rebond). Quelle que soit la consommation énergétique de départ, l'effet rebond (pour une variation d'un degré de la température intérieure) d'une rénovation conduisant à une consommation finale de chauffage de 100 kWh/m<sup>2</sup>/an dans un logement utilisant un combustible valant 0,12 € TTC/kWh<sub>ef</sub> sera de 10,6 . 0,12 = 1,27 €/m<sup>2</sup>/an.

S'il s'agit d'électricité à 0,25 €/kWh ce sera 10,6 . 0,25 = 2,65 €/m<sup>2</sup>/an

### 3-2 Effet rebond référé à la consommation d'énergie utile avant rénovation

Moyennant un calcul manuel simple, l'information peut être obtenue rapidement à partir du tableau de la figure 6 et de la connaissance de l'énergie utile avant travaux. Si l'énergie utile avant travaux est de 250 kWh/m<sup>2</sup>/an et celle après travaux de 50, le tableau de la figure 6 indique que l'effet rebond vaut 6,2 kWh/m<sup>2</sup>/an. Référé à l'énergie utile avant travaux cela fait 2,5%.

Le tableau de la figure 8 donne directement la valeur de l'effet rebond en pourcentage de la consommation d'énergie utile avant rénovation, en fonction de celle-ci après rénovation. Ce tableau traduit la combinaison des relations (6) et (2).

Energie utile de chauffage après rénovation		Energie utile de chauffage avant rénovation (kWh <sub>eu</sub> /m <sup>2</sup> /an)									
		100	125	150	175	200	225	250	275	300	
(kWh <sub>eu</sub> /m <sup>2</sup> /an)	50	6,2	4,9	4,1	3,5	3,1	2,7	2,5	2,2	2,1	
	60	6,8	5,4	4,5	3,9	3,4	3,0	2,7	2,5	2,3	
	70	7,4	5,9	4,9	4,2	3,7	3,3	2,9	2,7	2,5	
	80	7,9	6,3	5,3	4,5	3,9	3,5	3,2	2,9	2,6	
	90		6,7	5,6	4,8	4,2	3,7	3,4	3,1	2,8	
	100		7,1	5,9	5,1	4,4	3,9	3,5	3,2	3,0	
	110			6,2	5,3	4,7	4,1	3,7	3,4	3,1	
	120			6,5	5,6	4,9	4,3	3,9	3,6	3,3	
	130				5,8	5,1	4,5	4,1	3,7	3,4	
	140				6,1	5,3	4,7	4,2	3,9	3,5	
	150					5,5	4,9	4,4	4,0	3,7	
	160						5,0	4,5	4,1	3,8	
		Effet rebond en % de l'énergie utile avant rénovation pour une température intérieure en hausse de 1°C (base : 19°C)									

**Figure 8 : Effet rebond en % de l'énergie utile avant travaux pour une variation de 1°C de la température intérieure, en fonction de l'énergie utile spécifique après rénovation (quel que soit le mode de chauffage)**

**Exemple :** l'énergie utile de chauffage avant rénovation d'un logement est de 250 kWh/m<sup>2</sup>/an. Suite à une rénovation d'ampleur elle est passée à 50 kWh/m<sup>2</sup>/an. Le tableau

de la figure 8 indique que la variation d'un degré de la température intérieure (effet rebond) conduit à une variation de consommation qui est égale à 2,5% de la consommation initiale d'énergie utile, soit 6,3 kWh/m<sup>2</sup>/an. Ce résultat peut aussi être obtenu en utilisant les résultats du tableau de la figure 2 : la variation de 1°C de la température dans un logement dont la consommation utile est de 50 kWh/m<sup>2</sup>/an est de 12,3% de cette consommation, donc de 6,2 kWh/m<sup>2</sup>/an.

### 3-3 Effet rebond référé à la consommation d'énergie finale avant rénovation

On objectera légitimement que les consommations d'énergie utile sont difficiles à connaître. La même procédure que précédemment peut être mise en œuvre à partir du tableau de la figure 7 et de la connaissance des consommations d'énergie finale avant et après travaux. Si, pour un combustible, ces consommations valent respectivement 200 et 100 kWh/m<sup>2</sup>/an, le tableau de la figure 7 indique que l'effet rebond est de 10,6 kWh/m<sup>2</sup>/an, ce qui donne, référé à la consommation avant travaux, 5,3%.

Avec les hypothèses sur l'approximation des rendements proposées précédemment, le tableau de la figure 9 exprime directement, à partir des relations (7) et (4), pour des logements équipés de générateurs à combustible avant et après rénovation, l'effet rebond en pourcentage de la consommation d'énergie finale avant rénovation.

Energie finale de chauffage (ef) (kWh/m <sup>2</sup> /an)		Energie finale de chauffage (ef) avant rénovation (kWh/m <sup>2</sup> /an)									
		100	125	150	175	200	225	250	275	300	
après rénovation	50	7,2	5,7	4,8	4,1	3,6	3,2	2,9	2,6	2,4	
	60	8,0	6,4	5,3	4,5	4,0	3,5	3,2	2,9	2,7	
	70	8,7	6,9	5,8	5,0	4,3	3,9	3,5	3,2	2,9	
	80	9,4	7,5	6,2	5,3	4,7	4,2	3,7	3,4	3,1	
	90		8,0	6,7	5,7	5,0	4,4	4,0	3,6	3,3	
	100		8,5	7,1	6,1	5,3	4,7	4,2	3,9	3,5	
	110			7,5	6,4	5,6	5,0	4,5	4,1	3,7	
	120			7,8	6,7	5,9	5,2	4,7	4,3	3,9	
	130				7,0	6,2	5,5	4,9	4,5	4,1	
Cas des chauffages par combustibles	140				7,3	6,4	5,7	5,1	4,7	4,3	
	150					6,7	5,9	5,3	4,9	4,4	
	160						6,2	5,5	5,0	4,6	
		Effet rebond en % de l'énergie finale avant rénovation pour une température intérieure en hausse de 1°C (base : 19°C)									

Figure 9 : Effet rebond en % de l'énergie finale avant travaux pour une variation de 1°C de la température intérieure, en fonction de l'énergie finale après rénovation (cas du chauffage par combustibles)

**Exemple :** Quel est l'impact, exprimé en valeur relative de la consommation d'énergie finale avant travaux, d'une élévation de 1°C de la température de consigne pour un logement consommant avant rénovation 200 kWh/m<sup>2</sup>/an d'énergie finale, et 100 kWh/m<sup>2</sup>/an après travaux ? L'effet rebond vaut alors 5,3% de la consommation d'énergie finale de chauffage avant travaux, soit 10,6 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Les logements avec chauffage électrique (Joule) doivent être traités différemment car ils n'ont pas le même rendement que les systèmes avec générateur à combustible, distribution hydraulique et émission par radiateurs (ou planchers chauffants). A partir des relations (7) et (5), le tableau de la figure 10 exprime, pour des logements chauffés par effet Joule avant et après rénovation, l'effet rebond en pourcentage de la consommation d'énergie finale avant rénovation.

Energie finale de chauffage (ef) après rénovation (kWh/m <sup>2</sup> /an)	Energie finale de chauffage (ef) avant rénovation (kWh/m <sup>2</sup> /an)									
	100	125	150	175	200	225	250	275	300	
50	6,3	5,0	4,2	3,6	3,2	2,8	2,5	2,3	2,1	
60	6,9	5,6	4,6	4,0	3,5	3,1	2,8	2,5	2,3	
70	7,5	6,0	5,0	4,3	3,8	3,3	3,0	2,7	2,5	
80	8,1	6,5	5,4	4,6	4,0	3,6	3,2	2,9	2,7	
90		6,9	5,7	4,9	4,3	3,8	3,4	3,1	2,9	
100		7,3	6,1	5,2	4,5	4,0	3,6	3,3	3,0	
110			6,4	5,5	4,8	4,2	3,8	3,5	3,2	
120			6,7	5,7	5,0	4,4	4,0	3,6	3,3	
130				6,0	5,2	4,6	4,2	3,8	3,5	
Cas des chauffages par effet Joule	140			6,2	5,4	4,8	4,3	3,9	3,6	
	150				5,6	5,0	4,5	4,1	3,7	
	160					5,2	4,7	4,2	3,9	
Effet rebond en % de l'énergie finale avant rénovation pour une température intérieure en hausse de 1°C (base : 19°C)										

Figure 10 : Effet rebond en % de l'énergie finale avant travaux pour une variation de 1°C de la température intérieure, en fonction de l'énergie finale après rénovation (cas du chauffage par effet Joule)

### 3-4 Effet rebond référé à l'économie d'énergie finale après rénovation

L'effet rebond peut-il détruire en tout ou partie les gains relatifs à une rénovation ? On se bornera dans ce qui suit à évaluer l'impact d'une hausse de 1°C de la température intérieure. Pour une élévation supérieure à 1°C on pourrait considérer, en première approximation et de manière pessimiste, que l'impact est proportionnel à l'élévation de température.

Comme dans les deux paragraphes précédents, on peut utiliser les tableaux des figures 6 et 7 et faire soi-même le calcul. L'effet rebond pour une rénovation conduisant à faire passer l'énergie finale de 300 à 50 kWh/m<sup>2</sup>/an est, selon la figure 7, de 7,2 kWh/m<sup>2</sup>/an. Référé à une économie de 250 kWh/m<sup>2</sup>/an, cet effet rebond représente 2,9% de l'économie escomptée.

A partir des relations (7) et (4), le tableau de la figure 11 donne directement, pour des logements chauffés par combustibles avant et après travaux, l'expression de l'effet rebond en pourcentage de l'économie d'énergie finale escomptée :

Conso chauffage (ef) après rénovation (kWh/m <sup>2</sup> /an)	Consommation de chauffage (ef) avant rénovation (kWh/m <sup>2</sup> /an)									
	100	125	150	175	200	225	250	275	300	
50	14,3	9,6	7,2	5,7	4,8	4,1	3,6	3,2	2,9	
60	19,9	12,2	8,8	6,9	5,7	4,8	4,2	3,7	3,3	
70	28,9	15,8	10,8	8,3	6,7	5,6	4,8	4,2	3,8	
80	46,8	20,8	13,4	9,8	7,8	6,5	5,5	4,8	4,3	
90		28,6	16,7	11,8	9,1	7,4	6,2	5,4	4,8	
100		42,4	21,2	14,1	10,6	8,5	7,1	6,1	5,3	
110			28,0	17,2	12,4	9,7	8,0	6,8	5,9	
120			39,2	21,4	14,7	11,2	9,0	7,6	6,5	
130				27,3	17,6	13,0	10,3	8,5	7,2	
Cas des chauffages par combustibles	140			36,7	21,4	15,1	11,7	9,5	8,0	
	150				26,7	17,8	13,3	10,7	8,9	
	160					21,3	15,4	12,0	9,9	
Effet rebond en % de l'économie d'énergie finale escomptée pour une température intérieure en hausse de 1°C (base : 19°C)										

Figure 11 : Effet rebond en % de l'économie d'énergie finale escomptée pour une variation de 1°C de la température intérieure (chauffage par combustible)

**Exemple :** quel est l'impact relatif de l'effet rebond (hausse de 1°C) sur l'économie de travaux de rénovation ambitieux portant la consommation d'énergie finale de 300 à 50 kWh/m<sup>2</sup>/an ?

L'impact est de 2,9%, donc insignifiant, soit 7,3 kWh<sub>ef</sub>/m<sup>2</sup>/an.

Mais quel est l'impact de l'effet rebond pour une rénovation relativement peu ambitieuse (par exemple la dernière étape d'une rénovation par étapes) portant la consommation de 100 à 50 kWh/m<sup>2</sup>/an ? Il est de 14,3 %, soit 7,2 kWh/m<sup>2</sup>/an.

**Il apparaît que plus l'économie d'énergie escomptée est importante, plus l'impact relatif de l'effet rebond sur l'économie d'énergie est faible, voire peu significatif. Ceci met en garde contre les « petites rénovations », comme les rénovations par étapes ou les simples gestes, qui seront beaucoup plus affectées par l'effet rebond.**

A partir des relations (7) et (5), le tableau de la figure 12 donne directement, pour des logements chauffés par effet Joule avant et après travaux, l'expression de l'effet rebond en pourcentage de l'économie d'énergie finale escomptée :

Conso chauffage (ef) après rénovation (kWh <sub>ef</sub> /m <sup>2</sup> /an)	Consommation de chauffage (ef) avant rénovation (kWh <sub>ef</sub> /m <sup>2</sup> /an)									
	100	125	150	175	200	225	250	275	300	
50	12,6	8,4	6,3	5,0	4,2	3,6	3,2	2,8	2,5	
60	17,4	10,7	7,7	6,0	5,0	4,2	3,7	3,2	2,9	
70	25,1	13,7	9,4	7,2	5,8	4,9	4,2	3,7	3,3	
80	40,4	18,0	11,5	8,5	6,7	5,6	4,8	4,1	3,7	
90		24,6	14,3	10,1	7,8	6,4	5,4	4,6	4,1	
100		36,4	18,2	12,1	9,1	7,3	6,1	5,2	4,5	
110			23,9	14,7	10,6	8,3	6,8	5,8	5,0	
120			33,3	18,2	12,5	9,5	7,7	6,5	5,6	
130				23,2	14,9	11,0	8,7	7,2	6,1	
Cas des chauffages par effet Joule	140			31,0	18,1	12,8	9,9	8,0	6,8	
	150				22,5	15,0	11,2	9,0	7,5	
	160					17,9	12,9	10,1	8,3	
Effet rebond en % de l'économie d'énergie finale escomptée pour une température intérieure en hausse de 1°C (base : 19°C)										

Figure 12 : Effet rebond en % de l'économie d'énergie finale escomptée pour une variation de 1°C de la température intérieure (chauffage par effet Joule)

#### 4 – Cas particulier de la mise en œuvre d'une pompe à chaleur, avec ou sans rénovation

Le cas des pompes à chaleur doit être traité par des règles d'application sensiblement différentes de celles utilisées jusqu'à présent, particulièrement dans le cas où la PAC est mise en œuvre sans qu'il soit procédé à une rénovation préalable du bâti. Le détail de l'approche théorique figure au §2 de l'annexe.

On connaît en principe les déperditions surfaciques avant pose de la pompe à chaleur :  $d_0$  en W/m<sup>2</sup>/K. Si on ne connaît que  $e_{f0}$  (l'énergie finale avant travaux), on peut calculer  $d_0$  simplement :

$$e_{f0} = e_{u0} \cdot i / \eta_{gl} \quad \text{et} \quad e_{u0} = (d_0 \cdot N_h - a) \quad (\text{voir annexe})$$

$$\text{d'où } d_0 = (e_{f0} \cdot \eta_{gl} / i + a) / N_h$$

Si on fait des travaux de rénovation, on connaît les déperditions spécifiques après travaux :  $d$  en W/m<sup>2</sup>/K. On définit  $r = d_0/d$  qui est le rapport des déperditions surfaciques avant et après travaux.

A partir des données climatiques locales on connaît  $N_h$  (en degrés.heures) pour la température de consigne (en principe 19°C) et par le calcul ou par estimation on détermine les apports gratuits récupérés « a » (en Wh/m<sup>2</sup>/an), ce qui permet de calculer le terme  $a/N_h/d_0$  (sans unité).

On peut alors **déterminer « k » qui est le rapport  $e_{u0}/e_u$  des énergies utiles spécifiques avant et après rénovation** (k vaut 1 s'il n'y a pas de travaux avant pose de la pompe à chaleur) soit en utilisant le graphique de la figure suivante (voir son origine au §2 de l'annexe) :

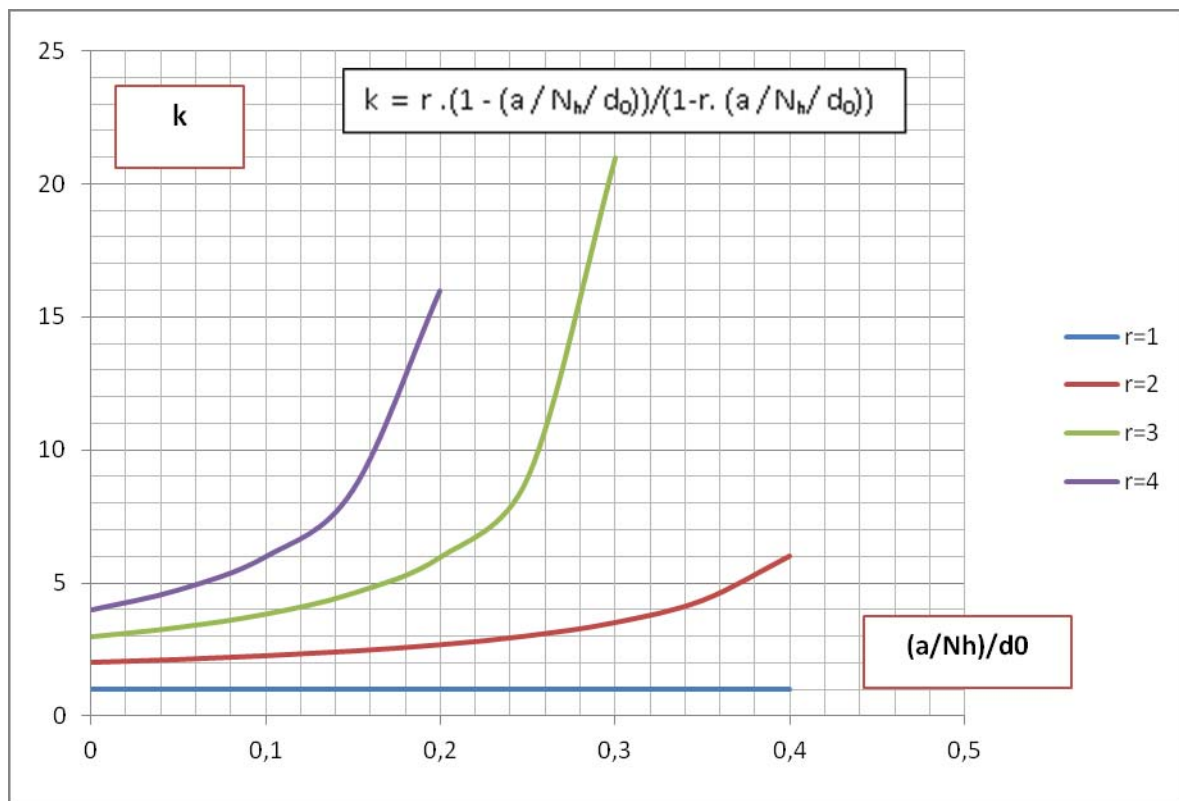


Figure 13 : Détermination de k à partir de la valeur de r et de la valeur de  $a/N_h/d_0$

soit à partir du calcul (voir annexe) en se basant sur les valeurs de r et de  $a/N_h/d_0$  (noté « q ») :

$$k = r \cdot (1 - q) / (1 - r \cdot q)$$

A partir de la valeur de k, de celle du COP moyen annuel de la PAC et de la consommation spécifique d'énergie finale avant rénovation ( $e_{f0}$ ), on peut déterminer les valeurs de l'énergie finale après rénovation et installation d'une PAC, ainsi que de l'effet rebond (pour une variation de température de 1°C) en pourcentage de l'énergie finale après travaux.

Cette détermination peut se faire par le calcul (voir développement en annexe) :

- Détermination du pourcentage d'effet rebond par rapport à l'énergie finale après travaux
 
$$T = 78,694 \times (e_{f0}^{0,918}/k)^{-0,474} \quad (\%) \quad (8)$$

- Détermination de l'énergie finale après travaux
 
$$e_f = e_{f0}^{0,918} / (k \cdot \eta_{der} \cdot COP) \quad (kWh/m^2/an) \quad (9)$$

où  $\eta_{der}$  est le rendement de distribution/émission et régulation de l'installation de chauffage existante

- Détermination de l'effet rebond

$$\Delta e_f = e_f \cdot T/100 \quad (\text{kWh/m}^2/\text{an}) \quad (10)$$

Mais on peut aussi utiliser les tableaux qui suivent (dans lesquels il est supposé que l'énergie de chauffage avant rénovation est un combustible et que le rendement de distribution/régulation/émission était de 80%). Ils ont été établis pour différentes valeurs de k. On interpolera entre les tableaux pour des valeurs de k intermédiaires.

N.B. : le cas k=1 correspond à la mise en place d'une PAC sans rénovation préalable.

<b>"k"</b> facteur de réduction de l'énergie utile par la rénovation, hors PAC : <b>1,0</b>																					
Energie finale $e_{f0}$ avant rénovation [kWh/m <sup>2</sup> /an]																					
	100		125		150		175		200		225		250		275		300				
T [%]	10,6		9,6		8,9		8,3		7,8		7,5		7,1		6,8		6,6				
COP	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$			
2,25	38,1	4,0	46,7	4,5	55,3	4,9	63,7	5,3	72,0	5,6	80,2	6,0	88,3	6,3	96,4	6,6	104,4	6,9			
2,50	34,3	3,6	42,1	4,0	49,7	4,4	57,3	4,8	64,8	5,1	72,2	5,4	79,5	5,7	86,8	5,9	94,0	6,2			
2,75	31,2	3,3	38,2	3,7	45,2	4,0	52,1	4,3	58,9	4,6	65,6	4,9	72,3	5,1	78,9	5,4	85,4	5,6			
3,00	28,6	3,0	35,1	3,4	41,4	3,7	47,7	4,0	54,0	4,2	60,1	4,5	66,2	4,7	72,3	4,9	78,3	5,2			
3,25	26,4	2,8	32,4	3,1	38,3	3,4	44,1	3,7	49,8	3,9	55,5	4,1	61,1	4,4	66,7	4,6	72,3	4,8			
3,50	24,5	2,6	30,0	2,9	35,5	3,2	40,9	3,4	46,3	3,6	51,5	3,8	56,8	4,0	62,0	4,2	67,1	4,4			
3,75	22,8	2,4	28,0	2,7	33,2	2,9	38,2	3,2	43,2	3,4	48,1	3,6	53,0	3,8	57,8	4,0	62,6	4,1			
4,00	21,4	2,3	26,3	2,5	31,1	2,8	35,8	3,0	40,5	3,2	45,1	3,4	49,7	3,5	54,2	3,7	58,7	3,9			
4,25	20,2	2,1	24,7	2,4	29,3	2,6	33,7	2,8	38,1	3,0	42,4	3,2	46,8	3,3	51,0	3,5	55,3	3,6			
4,50	19,0	2,0	23,4	2,2	27,6	2,5	31,8	2,6	36,0	2,8	40,1	3,0	44,2	3,1	48,2	3,3	52,2	3,4			
4,75	18,0	1,9	22,1	2,1	26,2	2,3	30,2	2,5	34,1	2,7	38,0	2,8	41,8	3,0	45,7	3,1	49,5	3,3			
5,00	17,1	1,8	21,0	2,0	24,9	2,2	28,6	2,4	32,4	2,5	36,1	2,7	39,7	2,8	43,4	3,0	47,0	3,1			
$\Delta e_f$ et $e_f$ en kWh/m <sup>2</sup> /an										Rendement distribution/émission/régulation (%) :										80%	

**Figure 14 : Détermination de l'énergie finale spécifique après travaux et de l'effet rebond à partir des valeurs de l'énergie finale spécifique avant rénovation et du COP de la pompe à chaleur, pour k=1**

<b>"k"</b> facteur de réduction de l'énergie utile par la rénovation, hors PAC : <b>2,0</b>																					
Energie finale $e_{f0}$ avant rénovation [kWh/m <sup>2</sup> /an]																					
	100		125		150		175		200		225		250		275		300				
T [%]	14,7		13,4		12,4		11,6		10,9		10,4		9,9		9,5		9,1				
COP	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$	ef	$\Delta e_f$			
2,25	19,0	2,8	23,4	3,1	27,6	3,4	31,8	3,7	36,0	3,9	40,1	4,2	44,2	4,4	48,2	4,6	52,2	4,8			
2,50	17,1	2,5	21,0	2,8	24,9	3,1	28,6	3,3	32,4	3,5	36,1	3,7	39,7	3,9	43,4	4,1	47,0	4,3			
2,75	15,6	2,3	19,1	2,6	22,6	2,8	26,0	3,0	29,4	3,2	32,8	3,4	36,1	3,6	39,4	3,7	42,7	3,9			
3,00	14,3	2,1	17,5	2,3	20,7	2,6	23,9	2,8	27,0	2,9	30,1	3,1	33,1	3,3	36,1	3,4	39,2	3,6			
3,25	13,2	1,9	16,2	2,2	19,1	2,4	22,0	2,5	24,9	2,7	27,8	2,9	30,6	3,0	33,4	3,2	36,1	3,3			
3,50	12,2	1,8	15,0	2,0	17,8	2,2	20,5	2,4	23,1	2,5	25,8	2,7	28,4	2,8	31,0	2,9	33,6	3,1			
3,75	11,4	1,7	14,0	1,9	16,6	2,0	19,1	2,2	21,6	2,4	24,1	2,5	26,5	2,6	28,9	2,7	31,3	2,9			
4,00	10,7	1,6	13,1	1,8	15,5	1,9	17,9	2,1	20,2	2,2	22,5	2,3	24,8	2,5	27,1	2,6	29,4	2,7			
4,25	10,1	1,5	12,4	1,7	14,6	1,8	16,9	1,9	19,0	2,1	21,2	2,2	23,4	2,3	25,5	2,4	27,6	2,5			
4,50	9,5	1,4	11,7	1,6	13,8	1,7	15,9	1,8	18,0	2,0	20,0	2,1	22,1	2,2	24,1	2,3	26,1	2,4			
4,75	9,0	1,3	11,1	1,5	13,1	1,6	15,1	1,7	17,0	1,9	19,0	2,0	20,9	2,1	22,8	2,2	24,7	2,3			
5,00	8,6	1,3	10,5	1,4	12,4	1,5	14,3	1,7	16,2	1,8	18,0	1,9	19,9	2,0	21,7	2,1	23,5	2,1			
$\Delta e_f$ et $e_f$ en kWh/m <sup>2</sup> /an										Rendement distribution/émission/régulation (%) :										80%	

**Figure 15 : Détermination de l'énergie finale spécifique après travaux et de l'effet rebond à partir des valeurs de l'énergie finale spécifique avant rénovation et du COP de la pompe à chaleur, pour k=2**

"k" facteur de réduction de l'énergie utile par la rénovation, hors PAC : 3,0																				
Energie finale e <sub>0</sub> avant rénovation [kWh <sub>eff</sub> /m <sup>2</sup> /an]																				
	100		125		150		175		200		225		250		275		300			
T [%]	17,9		16,2		15,0		14,0		13,2		12,5		12,0		11,5		11,1			
COP	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef		
2,25	12,7	2,3	15,6	2,5	18,4	2,8	21,2	3,0	24,0	3,2	26,7	3,4	29,4	3,5	32,1	3,7	34,8	3,9		
2,50	11,4	2,0	14,0	2,3	16,6	2,5	19,1	2,7	21,6	2,9	24,1	3,0	26,5	3,2	28,9	3,3	31,3	3,5		
2,75	10,4	1,9	12,7	2,1	15,1	2,3	17,4	2,4	19,6	2,6	21,9	2,7	24,1	2,9	26,3	3,0	28,5	3,2		
3,00	9,5	1,7	11,7	1,9	13,8	2,1	15,9	2,2	18,0	2,4	20,0	2,5	22,1	2,6	24,1	2,8	26,1	2,9		
3,25	8,8	1,6	10,8	1,7	12,8	1,9	14,7	2,1	16,6	2,2	18,5	2,3	20,4	2,4	22,2	2,6	24,1	2,7		
3,50	8,2	1,5	10,0	1,6	11,8	1,8	13,6	1,9	15,4	2,0	17,2	2,2	18,9	2,3	20,7	2,4	22,4	2,5		
3,75	7,6	1,4	9,3	1,5	11,1	1,7	12,7	1,8	14,4	1,9	16,0	2,0	17,7	2,1	19,3	2,2	20,9	2,3		
4,00	7,1	1,3	8,8	1,4	10,4	1,6	11,9	1,7	13,5	1,8	15,0	1,9	16,6	2,0	18,1	2,1	19,6	2,2		
4,25	6,7	1,2	8,2	1,3	9,8	1,5	11,2	1,6	12,7	1,7	14,1	1,8	15,6	1,9	17,0	2,0	18,4	2,0		
4,50	6,3	1,1	7,8	1,3	9,2	1,4	10,6	1,5	12,0	1,6	13,4	1,7	14,7	1,8	16,1	1,8	17,4	1,9		
4,75	6,0	1,1	7,4	1,2	8,7	1,3	10,1	1,4	11,4	1,5	12,7	1,6	13,9	1,7	15,2	1,8	16,5	1,8		
5,00	5,7	1,0	7,0	1,1	8,3	1,2	9,5	1,3	10,8	1,4	12,0	1,5	13,2	1,6	14,5	1,7	15,7	1,7		
Δef et ef en kWh <sub>eff</sub> /m <sup>2</sup> /an															Rendement distribution/émission/régulation (%) :				80%	

Figure 16 : Détermination de l'énergie finale spécifique après travaux et de l'effet rebond à partir des valeurs de l'énergie finale spécifique avant rénovation et du COP de la pompe à chaleur, pour k=3

"k" facteur de réduction de l'énergie utile par la rénovation, hors PAC : 4,0																				
Energie finale e <sub>0</sub> avant rénovation [kWh <sub>eff</sub> /m <sup>2</sup> /an]																				
	100		125		150		175		200		225		250		275		300			
T [%]	20,5		18,6		17,2		16,0		15,1		14,4		13,7		13,2		12,7			
COP	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef		
2,25	9,5	1,9	11,7	2,2	13,8	2,4	15,9	2,6	18,0	2,7	20,0	2,9	22,1	3,0	24,1	3,2	26,1	3,3		
2,50	8,6	1,8	10,5	2,0	12,4	2,1	14,3	2,3	16,2	2,5	18,0	2,6	19,9	2,7	21,7	2,9	23,5	3,0		
2,75	7,8	1,6	9,6	1,8	11,3	1,9	13,0	2,1	14,7	2,2	16,4	2,4	18,1	2,5	19,7	2,6	21,4	2,7		
3,00	7,1	1,5	8,8	1,6	10,4	1,8	11,9	1,9	13,5	2,0	15,0	2,2	16,6	2,3	18,1	2,4	19,6	2,5		
3,25	6,6	1,3	8,1	1,5	9,6	1,6	11,0	1,8	12,5	1,9	13,9	2,0	15,3	2,1	16,7	2,2	18,1	2,3		
3,50	6,1	1,3	7,5	1,4	8,9	1,5	10,2	1,6	11,6	1,8	12,9	1,9	14,2	1,9	15,5	2,0	16,8	2,1		
3,75	5,7	1,2	7,0	1,3	8,3	1,4	9,5	1,5	10,8	1,6	12,0	1,7	13,2	1,8	14,5	1,9	15,7	2,0		
4,00	5,4	1,1	6,6	1,2	7,8	1,3	9,0	1,4	10,1	1,5	11,3	1,6	12,4	1,7	13,6	1,8	14,7	1,9		
4,25	5,0	1,0	6,2	1,1	7,3	1,3	8,4	1,4	9,5	1,4	10,6	1,5	11,7	1,6	12,8	1,7	13,8	1,8		
4,50	4,8	1,0	5,8	1,1	6,9	1,2	8,0	1,3	9,0	1,4	10,0	1,4	11,0	1,5	12,0	1,6	13,1	1,7		
4,75	4,5	0,9	5,5	1,0	6,5	1,1	7,5	1,2	8,5	1,3	9,5	1,4	10,5	1,4	11,4	1,5	12,4	1,6		
5,00	4,3	0,9	5,3	1,0	6,2	1,1	7,2	1,1	8,1	1,2	9,0	1,3	9,9	1,4	10,8	1,4	11,7	1,5		
Δef et ef en kWh <sub>eff</sub> /m <sup>2</sup> /an															Rendement distribution/émission/régulation (%) :				80%	

Figure 17 : Détermination de l'énergie finale spécifique après travaux et de l'effet rebond à partir des valeurs de l'énergie finale spécifique avant rénovation et du COP de la pompe à chaleur, pour k=4

"k" facteur de réduction de l'énergie utile par la rénovation, hors PAC : 5,0																				
Energie finale e <sub>0</sub> avant rénovation [kWh/m <sup>2</sup> /an]																				
	100		125		150		175		200		225		250		275		300			
T [%]	22,8		20,6		19,1		17,8		16,8		16,0		15,3		14,6		14,1			
COP	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef	ef	Δef		
2,25	7,6	1,7	9,3	1,9	11,1	2,1	12,7	2,3	14,4	2,4	16,0	2,6	17,7	2,7	19,3	2,8	20,9	2,9		
2,50	6,9	1,6	8,4	1,7	9,9	1,9	11,5	2,0	13,0	2,2	14,4	2,3	15,9	2,4	17,4	2,5	18,8	2,7		
2,75	6,2	1,4	7,6	1,6	9,0	1,7	10,4	1,9	11,8	2,0	13,1	2,1	14,5	2,2	15,8	2,3	17,1	2,4		
3,00	5,7	1,3	7,0	1,4	8,3	1,6	9,5	1,7	10,8	1,8	12,0	1,9	13,2	2,0	14,5	2,1	15,7	2,2		
3,25	5,3	1,2	6,5	1,3	7,7	1,5	8,8	1,6	10,0	1,7	11,1	1,8	12,2	1,9	13,3	2,0	14,5	2,0		
3,50	4,9	1,1	6,0	1,2	7,1	1,4	8,2	1,5	9,3	1,6	10,3	1,6	11,4	1,7	12,4	1,8	13,4	1,9		
3,75	4,6	1,0	5,6	1,2	6,6	1,3	7,6	1,4	8,6	1,5	9,6	1,5	10,6	1,6	11,6	1,7	12,5	1,8		
4,00	4,3	1,0	5,3	1,1	6,2	1,2	7,2	1,3	8,1	1,4	9,0	1,4	9,9	1,5	10,8	1,6	11,7	1,7		
4,25	4,0	0,9	4,9	1,0	5,9	1,1	6,7	1,2	7,6	1,3	8,5	1,4	9,4	1,4	10,2	1,5	11,1	1,6		
4,50	3,8	0,9	4,7	1,0	5,5	1,1	6,4	1,1	7,2	1,2	8,0	1,3	8,8	1,3	9,6	1,4	10,4	1,5		
4,75	3,6	0,8	4,4	0,9	5,2	1,0	6,0	1,1	6,8	1,1	7,6	1,2	8,4	1,3	9,1	1,3	9,9	1,4		
5,00	3,4	0,8	4,2	0,9	5,0	0,9	5,7	1,0	6,5	1,1	7,2	1,2	7,9	1,2	8,7	1,3	9,4	1,3		
	Δef et ef en kWh/m <sup>2</sup> /an								Rendement distribution/émission/régulation (%) :								80%			

Figure 18 : Détermination de l'énergie finale spécifique après travaux et de l'effet rebond à partir des valeurs de l'énergie finale spécifique avant rénovation et du COP de la pompe à chaleur, pour k=5

## Exemples d'application pour la pose de PAC avec ou sans travaux de rénovation

Ordres de grandeurs des paramètres :

- Apports gratuits récupérés : les valeurs courantes varient de 12 à 20 000 Wh/m<sup>2</sup>/an
- Valeurs de N<sub>h</sub> (nombre de degrés.heures base 19°C) : N<sub>h</sub> vaut de 40 000 à 60 000 degrés.heures en zone de plaine selon que le climat est méditerranéen ou continental.
- Les déperditions spécifiques « d » d'un bâtiment très performant sont proches de 1,0 W/m<sup>2</sup>K et celle d'un bâtiment de classe G peut valoir 5,0 W/m<sup>2</sup>K

**Cas n°1 :** rénovation d'un logement chauffé au gaz dont la consommation spécifique en énergie finale est de 300 kWh/m<sup>2</sup>/an. Le rendement  $\eta_{\text{der}}$  de distribution/émission/régulation vaut 80% et le rendement global  $\eta_{\text{gl}}$  63%. Les apports gratuits récupérés valent 15 kWh/m<sup>2</sup>/an, le coefficient d'intermittence « i » 0,9 et le nombre de degrés.heures de base 19°C est de 60 000. On envisage deux cas de rénovation :

- **Cas 1-1 :** pas de rénovation de l'enveloppe mais mise en place d'une PAC moyenne température dont le COP annuel est de 3 (à cause du niveau plus élevé de la température de distribution dû à l'absence de réduction des besoins).
- **Cas 1-2 :** forte isolation de l'enveloppe conduisant à une division par 3 des déperditions, et à un COP de 3,5 (grâce à la baisse de la température de distribution).

**Cas 1-1 :** l'absence de travaux est un cas simple car k=r=1. On peut donc directement utiliser le tableau de la figure 14 :

T vaut 6,6 % ; l'énergie finale spécifique vaut 78,3 kWh/m<sup>2</sup>/an (il s'agit d'électricité), et l'effet rebond vaut donc 78,3 . 0,066 = 5 kWh/m<sup>2</sup>/an pour un écart de 1°C (soit 6,6%).

**Cas 1-2 :** on connaît  $r = d_0/d = 3$ . Mais il faut connaître k et pour cela déterminer la valeur du paramètre  $a/N_h/d_0$  dans lequel  $d_0$  n'est pas connu.

Mais  $e_{f0} = e_{u0} \cdot i / \eta_{gl}$  et  $e_{u0} = (d_0 \cdot N_h - a)$  (voir annexe) d'où  $d_0 = (e_{f0} \cdot \eta_{gl} / i + a) / N_h$

Numériquement :

$$d_0 = (300\,000 \cdot 0,63 / 0,9 + 15000) / 60\,000 = 3,75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Le paramètre « q » vaut alors :  $q = a / N_h / d_0 = 15\,000 / 50\,000 / 3,75 = 0,067$

On peut alors déterminer k, soit par le graphique de la figure 8 ( $k \approx 3,5$ ) soit par calcul :

$$k = r \cdot (1 - q) / (1 - r \cdot q)$$

$$\text{soit } k = 3 \cdot (1 - 0,067) / (1 - 3 \cdot 0,067) = 3,5$$

Une interpolation entre les tableaux des figures 16 et 17 (pour  $k=3,5$ ) donne une consommation finale spécifique d'électricité après travaux de 19,6 kWh/m<sup>2</sup>/an et un effet rebond pour 1°C d'écart de 2,3 kWh/m<sup>2</sup>/an par rapport à cette énergie finale (on en déduit que  $T = 2,3 / 19,6 = 11,9\%$ ).

A défaut on peut faire une détermination plus précise à partir du calcul et des relations développées plus haut, ce qui conduit successivement à :

$$T = 78,694 \cdot (300^{0,918} / 3,5)^{-0,474} = 11,9\%$$

$$e_f = 300^{0,918} / 3,5 / 3,5 / 0,8 = 19,2 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$$

$$\Delta e_f = 19,2 \cdot 0,119 = 2,3 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$$

On peut conclure de ces deux exemples dans lesquels une PAC remplace un générateur à combustion que, lorsque le bâtiment n'est pas isolé préalablement, le poids de l'effet rebond (pour 1°C d'écart) n'est que de 6,6% de la consommation d'énergie finale (soit 5 kWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité), ce qui est peu de chose, mais lorsque le bâtiment commence par être rénové la part de l'effet rebond sur la consommation finale après travaux passe à 11,9 % ce qui ne représente toutefois que 2,3 kWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité, soit encore moins que dans le premier cas. On observe que, très logiquement, **la PAC réduit l'importance de l'effet rebond, que le bâtiment soit ou non rénové au préalable.**

## CONCLUSION GENERALE

Ce qui précède fait apparaître que, lors des rénovations de logements chauffés par combustible ou par effet Joule, la surconsommation énergétique de **l'effet rebond consécutif à une augmentation de la température intérieure, ne dépend que de la consommation d'énergie utile spécifique de chauffage  $e_u$  (kWh/m<sup>2</sup>/an), et donc aussi de la consommation d'énergie finale, après rénovation. La surconsommation due à l'effet rebond est d'autant plus faible que l'énergie utile spécifique et l'élévation de température après rénovation sont faibles.**

En d'autres termes, plus l'amélioration énergétique (kWh/m<sup>2</sup>/an) de la rénovation est importante, plus la valeur relative de l'effet rebond rapportée à l'économie d'énergie est faible, **voire peu significative. Ceci met en garde contre les « petites rénovations » qui seront beaucoup plus affectées par l'effet rebond, notamment toutes les rénovations dites « par étapes » ou les simples gestes.** C'est une raison supplémentaire, lorsqu'on envisage une rénovation, d'avoir l'ambition d'une rénovation complète et performante plutôt que celle d'une rénovation ponctuelle à l'effet limité.

Les valeurs de surconsommation de l'effet rebond (pour 1°C de variation de la température ambiante) s'écrivent simplement :

$\Delta_{eu} = 0,78694 \cdot e_u^{0,526}$  [kWh/m<sup>2</sup>/an] pour les combustibles et l'effet Joule

$\Delta_{ef} = 0,78694 \cdot e_f^{0,565}$  [kWh/m<sup>2</sup>/an] pour les combustibles

$\Delta_{ef} = 0,80631 \cdot e_f^{0,526}$  [kWh/m<sup>2</sup>/an] pour l'effet Joule

Pour des consommations d'énergie finale après rénovation inférieures à 150 kWh/m<sup>2</sup>/an, l'effet rebond vaut donc entre 5 kWh/m<sup>2</sup>/an (pour une consommation d'énergie finale de 30 kWh/m<sup>2</sup>/an) et 13 kWh/m<sup>2</sup>/an (pour une consommation d'énergie finale de 150 kWh/m<sup>2</sup>/an) conduisant à un surcoût de 1,2 à 3,0 € TTC/m<sup>2</sup>/an pour les énergies les plus chères et de 0,35 à 0,9 € TTC/m<sup>2</sup>/an pour les moins chères.

Il apparaît donc que l'effet rebond ne peut à lui seul expliquer les écarts considérables entre réalité et « prévision » que certaines études ont avancés concernant les rénovations de logements chauffés par combustibles ou par effet Joule. On peut même dire que d'une manière générale l'effet rebond est très peu significatif, et il l'est d'autant moins que les rénovations sont ambitieuses et les consommations atteintes (ou ambitionnées) basses. Il vaudra mieux chercher des explications dans le concept de « prévision » qui confond la plupart du temps le résultat d'un calcul conventionnel, tel celui de la consommation normalisée des véhicules, avec un véritable calcul de prévision utilisant des outils de modélisation lourds permettant d'approcher à 10% (mais pas mieux) la réalité mesurée.

Enfin, **toutes les campagnes de mesure faites par le bureau d'études Enertech<sup>5</sup> sur de nombreux logements rénovés montrent qu'il y a très peu de dérive dans la température des logements rénovés qui est la plupart du temps la même avant et après rénovation**, et que les seuls cas où l'on observe une augmentation de la température et donc de la consommation (on peut alors atteindre 22°C) concernent les rénovations comportant des robinets thermostatiques comme seuls éléments de régulation. Ces dispositifs ne

---

<sup>5</sup> Pour accéder aux rapports des campagnes de mesures : <https://www.enertech.fr/theme/outils/?t=49#filter-box>

permettent pas une régulation fine que seul un thermostat d'ambiance peut offrir. Dans ce cas, l'effet rebond n'est pas choisi mais subi, et il existe des solutions techniques pour l'effacer, comme les thermostats ou les robinets thermostatiques électroniques (pour mémoire ces dispositifs sont rendus obligatoires à partir du 01/01/2027 dans tous les logements par le décret « régulation »<sup>6,7</sup>.

L'examen des logements dotés d'une PAC dont l'installation a été précédée ou non d'une rénovation du bâti confirme et amplifie même ce qui vient d'être dit : **la mise en place d'une PAC, précédée ou non d'une rénovation, rend légitimement encore moins significatif l'effet rebond puisqu'il évolue entre 1 et 6 kWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité, soit entre 0,25 et 1,5 € TTC/m<sup>2</sup>/an (pour 1°C de variation de la température intérieure).**

A partir des tableaux des figures 14 à 18 on peut extraire la surconsommation d'énergie due à l'effet rebond (en kWh/m<sup>2</sup>/an) en fonction des valeurs du rapport des énergies utiles spécifiques avant et après rénovation (noté « k ») et du COP pour deux valeurs de la consommation initiale d'énergie finale de chauffage (100 et 200 kWh/m<sup>2</sup>/an) :

		k							k					
COP		1	2	3	4	5			COP	1	2	3	4	5
2,25		4,0	2,8	2,3	1,9	1,7			2,25	5,6	3,9	3,2	2,7	2,4
3		3,0	2,1	1,7	1,5	1,3			3	4,2	2,9	2,4	2,0	1,8
4		2,3	1,6	1,3	1,1	1,0			4	3,2	2,2	1,8	1,5	1,4
ef0 = 100 kWh/m <sup>2</sup> /an						ef0 = 200 kWh/m <sup>2</sup> /an								

**Figure 19 : surconsommation due à l'effet rebond  $\Delta e_f$  (en kWh/m<sup>2</sup>/an) en fonction du niveau de rénovation (« k »), du COP annuel de la PAC, et du niveau de la consommation d'énergie finale initial de chauffage ( $e_{f0}$ )**

Rappelons que plus une rénovation thermique est de qualité, plus la valeur de « k » est élevée, et que « k » = 1 correspond à l'absence de rénovation avant pose d'une PAC.

Les tableaux de la figure 19 font apparaître que la quantité d'électricité (kWh/m<sup>2</sup>/an) de l'effet rebond ( $\Delta e_f$ ) :

- est d'autant plus importante que la qualité de la rénovation est médiocre (faible valeur de « k »),
- est d'autant plus faible que le COP annuel moyen de la PAC est élevé,
- est d'autant plus faible, à COP et effort de rénovation identiques, que l'énergie finale initiale de chauffage est faible,
- évolue entre 1 et 6 kWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité **maximum**, soit entre 0,25 et 1,5 € TTC/m<sup>2</sup>/an pour un écart de 1°C de la température ambiante,

Les solutions mettant en œuvre une PAC, que l'opération soit ou non précédée d'une rénovation, réduisent considérablement la valeur de l'effet rebond par rapport aux solutions de chauffage utilisant des combustibles ou de l'effet Joule. On peut considérer qu'avec une PAC l'effet rebond est extrêmement faible, ce qui n'est pas une raison pour ne pas respecter la température de consigne réglementaire de 19°C !

<sup>6</sup> <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000047651136/2023-06-09/>

<sup>7</sup> Et le guide d'application pour les particuliers (plus explicite) : [https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/plaquette\\_reglementaire\\_thermostats\\_calorifugeage\\_07\\_2023-2.pdf](https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/plaquette_reglementaire_thermostats_calorifugeage_07_2023-2.pdf)

## Annexe

### 1 - Evaluation de la surconsommation relative consécutive à une variation de température de consigne – Cas général valable sauf pour les pompes à chaleur

D'une façon simplifiée, en supposant neutres les phénomènes de stockage/déstockage d'énergie par l'inertie, il est possible d'exprimer de manière agrégée la consommation annuelle de chauffage d'un logement en énergie finale et en énergie utile comme suit :

$$E_f = (G \cdot V \cdot N_h - a \cdot S) \cdot i / \eta_{gl}$$
$$E_u = (G \cdot V \cdot N_h - a \cdot S) \quad \text{d'où aussi } E_f = E_u \cdot i / \eta_{gl}$$

Où :

- $E_f$  : Energie finale de chauffage [Wh]
- $E_u$  : Energie utile de chauffage [Wh]
- $G$  : coefficient de déperditions volumique [ $W/m^3K$ ]
- $S$  : surface habitable [ $m^2$ ]
- $V$  : volume habitable [ $m^3$ ] égal à  $S \times h_{sp}$  où  $h_{sp}$  : hauteur sous plafond [m]
- $N_{hTO}$  : degrés.heures de base  $T_0$  [ $^{\circ}C \cdot h$ ]
- $a$  : apports gratuits récupérés pendant la durée de la saison de chauffe [ $Wh/m^2/an$ ]

Il s'agit des apports solaires et des apports internes (électroménager, apports humains, pertes de chaleur des chauffe-eau, etc).

- $i$  : coefficient d'intermittence [-] – Traduit l'existence de périodes de ralenti.
- $\eta_{gl}$  : rendement global de l'installation

Nota :  $G \cdot V = D$  [ $W/K$ ] déperditions totales du logement.

Les variations relatives de consommation d'énergie finale et d'énergie utile suite à un écart de  $1^{\circ}C$  de la température intérieure s'écrivent :

$$\Delta E_f / E_f = [ (D \cdot \Delta N_h \cdot i / \eta_{gl}) ] / [(D \cdot N_{hTO} - a \cdot S) \cdot i / \eta_{gl}] = (D \cdot \Delta N_h) / (D \cdot N_{hTO} - a \cdot S)$$

$$\Delta E_u / E_u = (D \cdot \Delta N_h) / [(D \cdot N_{hTO} - a \cdot S)]$$

Ce qui montre que :

$$\Delta E_f / E_f = \Delta E_u / E_u$$

Si on divise les deux membres de l'expression  $\Delta E_f / E_f$  par la surface habitable, les consommations sont des consommations surfaciques (écriture en minuscules) et on obtient :

$$\Delta e_f / e_f = (d \cdot \Delta N_h) / (d \cdot N_{hTO} - a)$$

où  $d$  représente les déperditions surfaciques [ $W/m^2K$ ]. Rappelons que :

$$d = U_{bat} + 0,34 \cdot n \cdot h_{sp} \cdot (1 - \eta_{rec})$$

où  $U_{bat}$  est le coefficient de déperditions surfacique moyen de l'ensemble des parois du logement, « n » est le taux de renouvellement d'air (vol/h) et  $\eta_{rec}$  le rendement du récupérateur de chaleur lorsqu'il y a une ventilation double flux ( $\eta_{rec} = 0$  en simple flux ou en ventilation naturelle).

Et finalement :

$$\Delta e_f / e_f = (\Delta N_h / N_{hT0}) / (1 - a / (d \cdot N_{hT0}))$$

Avec également :

$$\Delta e_f / e_f = \Delta e_u / e_u = T$$

Ceci exprime la variation de consommation  $\Delta e_f$  de la consommation surfacique (ou spécifique) d'énergie finale après une augmentation de température de 1°C consécutive à des travaux d'amélioration énergétique dans un logement (**T**).

## 2-Cas particulier des pompes à chaleur

A la nomenclature précédente il faut rajouter :

- Indice « 0 » pour les paramètres caractérisant le logement et l'installation avant tout travaux (état initial),
- $\eta_{der}$  : rendement de distribution/émission/régulation de l'installation. Le produit de ce rendement par le rendement de génération de la chaudière est égal au rendement global. Ce rendement caractérise donc toute l'installation de chauffage, hors générateur de chaleur, existant avant les travaux de rénovation et la pose d'une PAC,
- COP : coefficient de performance annuel moyen de la pompe à chaleur
- k : en cas de travaux de rénovation préalables à l'installation d'une PAC, c'est le rapport des énergies utiles spécifiques avant et après travaux :  $k = e_{u0}/e_u$ . Il s'ensuit que  $k \geq 1$ .
- r : en cas de travaux de rénovation préalables à l'installation d'une PAC, c'est le rapport des déperditions surfaciques avant et après travaux ( $r = d_0/d$ ). Il s'ensuit que  $r \geq 1$ .

On a vu que  $e_{u0} = e_{f0} \cdot \eta_{g10}$  et que  $\eta_{g10} = e_{f0}^{-0,082}$

D'où :

$$e_{u0} = e_{f0}^{0,918}$$

Comme  $k = e_{u0}/e_u$  on peut écrire que  $e_u = e_{f0}^{0,918} / k$  et finalement, en tenant compte de la relation (2), on en déduit T :

$$T = 78,694 \times (e_{f0}^{0,918}/k)^{-0,474}$$

On peut aussi facilement calculer  $e_f$  :

$$e_f = e_u / (\eta_{der0} \cdot COP) \text{ et finalement :}$$

$$e_f = e_{f0}^{0,918} / (k \cdot \eta_{der0} \cdot COP)$$

Et bien sûr par la relation (4)  $\Delta e_f = e_f \cdot T$

Mais connaître « k » nécessite de connaître l'énergie utile avant et après travaux éventuels. Ce qui n'est pas toujours facile. En revanche on connaît beaucoup mieux les

déperditions et, à partir de « r » ( $r = d_0/d$ ), il va être possible de trouver une relation entre « k » et « r ».

On a vu précédemment que  $E_u = (G \cdot V \cdot N_h - a \cdot S)$   
 ou en divisant par S  $e_u = (GV/S) \cdot N_h - a = d \cdot N_h - a$

« k » s'exprime alors :  $k = (d_0 \cdot N_h - a) / (d \cdot N_h - a)$

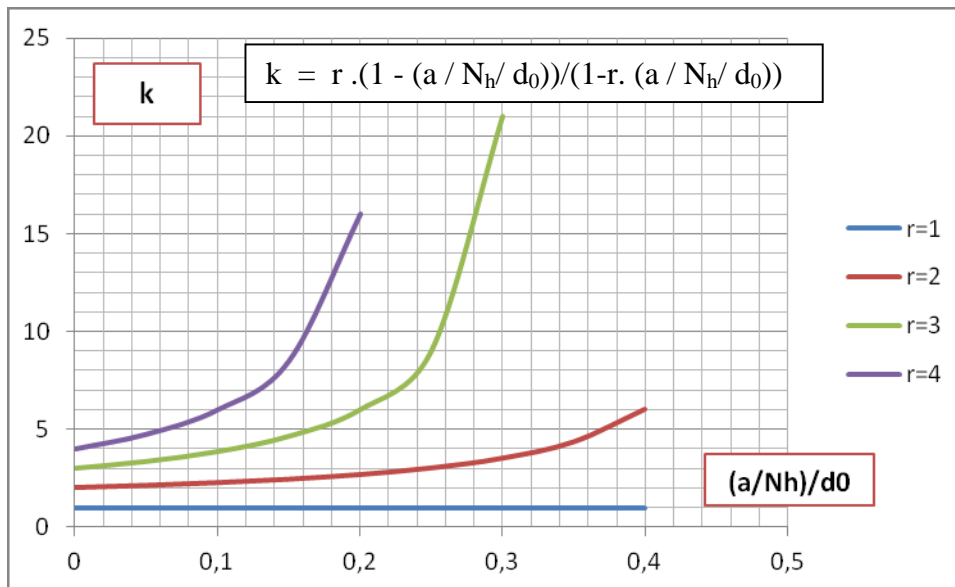
Soit, comme  $r = d_0/d$   $k = (d_0 \cdot N_h - a) / (d_0 / r \cdot N_h - a)$

$$k = (d_0 - a / N_h) / (d_0 / r - a / N_h) = r \cdot (d_0 - a / N_h) / (d_0 - r \cdot a / N_h)$$

A partir de cette relation on peut déduire que :

$$k = r \cdot (1 - (a / N_h / d_0)) / (1 - r \cdot (a / N_h / d_0))$$

Cette relation permet de déterminer « k » quand on connaît « r ». Le graphique ci-dessous permet directement cette détermination :



A noter que les différents paramètres doivent être cohérents entre eux. Ainsi doit-on toujours vérifier le caractère positif de l'expression au dénominateur à savoir :

$$1 - r \cdot (a / N_h / d_0) > 0 \text{ ou encore } r \cdot (a / N_h / d_0) < 1$$

Cette relation conditionnelle traduit le fait que l'on ne peut réduire fortement les déperditions (r élevé) que dans des bâtiments très déperditifs ( $d_0$  élevé)....