

Rapport de recherche

Etude comparative entre le chauffage à infrarouge et le chauffage central individuel au gaz
dans une construction ancienne

Direction de projets : Dr.-ing. Peter Kosack
Graduate School CVT
Arbeitskreis Ökologisches Bauen
(Cercle de travail la construction écologique)
Université technique de Kaiserslautern
Gotlieb-Daimler Strasse 42
67663 Kaiserslautern
Projet conduit du 1.10.2008 au 30.4.2009
Version 1; état(stand) : octobre 2009

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

**Le rapport de recherche peut être copié et diffusé à volonté DANS SON INTEGRALITE UNIQUEMENT.
Les copies partielles notamment susceptible d'en dénaturer le contenu sont totalement interdites
Traduction française depuis la version anglaise par Gilles PASDELOUP – Energetic Plus**

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

Résumé

Durant la période de chauffage 2008/2009, étude de cas incluant des mesures comparatives entre le chauffage à infrarouge et le chauffage central individuel au gaz.

L'étude est conduite avec pour objectif de fournir une évaluation objective sur l'utilité et les capacités du chauffage à infra rouge(1) comme mode de chauffage en environnement résidentiel dans le contexte actuel.

La présente étude a été capable de démontrer que le chauffage à infra rouge offre une alternative réaliste par rapport aux autres modes de chauffage traditionnels.

Lorsque le chauffage infra rouge est utilisé correctement, des avantages en terme de consommation d'énergie, de coûts ou d'émission CO2 apparaissent clairement.

1) L'étude porte sur le chauffage à infra rouge à ondes longues, dit « Infra rouges C », il existe des infra rouges à ondes courtes et moyennes, dits A et B, dont les propriétés sont différentes. L'étude apporte des précisions sur les différents types d'infra rouges, et des différences constatées lorsqu'il sont utilisés pour chauffer. Note du traducteur

Avant-propos

Vue générale, définition des objectifs de l'étude

Pendant la saison de chauffage 2008/2009, des mesures comparatives entre le chauffage par rayonnement infrarouge (en bref, le chauffage infrarouge) et le chauffage au gaz ont été effectuées. L'objectif était de déterminer les consommations et coûts en énergie rapportés à un exemple spécifique, puis, en utilisant cet exemple, de tenter de faire une évaluation généralisée des différences, aussi bien écologiques qu'économiques, entre ces deux modes de chauffage.

Motivation et contexte

Le marché actuel de l'énergie se caractérise par une significative et constante augmentation du prix des combustibles fossiles.

La pause marquée dans cette augmentation, résultant d'une crise financière mondiale, doit être comprise comme n'étant qu'une période de transition, comme cela peut être déjà constaté aujourd'hui.

Les propriétaires et occupants d'habitations anciennes ayant des consommations d'énergie notoirement élevées souffrent particulièrement de cette augmentation des prix. Il est vrai qu'il existe des mesures gouvernementales incitatives, destinées à promouvoir les travaux de rénovation, mais les moyens financiers nécessaires manquent dans nombre de cas, et cela malgré le grand nombre des possibilités d'aides gouvernementales.

Des chauffages électrique à infrarouges sont maintenant proposés sur le marché comme des solutions possibles. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'intérêt de cette solution, sur les plans économiques et écologiques, à travers un cas d'école.

Remerciements

Le responsable du projet tient à remercier très sincèrement la famille Dietz-Gross pour avoir mis à sa disposition les installations nécessaires à la réalisation de mesures opérées dans un contexte de vie quotidienne, ainsi que pour leur soutien pendant toute la durée de l'étude.

Un grand merci également à la société XXXXX qui nous a fournis les radiateurs infrarouge comme les instruments de mesure, tout en nous évitant nombre de tracasseries administratives.

Important

Le chauffage concernant un sujet d'intérêt général, ce rapport a été rédigé de manière à être compréhensible par des lecteurs sans connaissances techniques particulières. Il contient, exprimées de façon aussi simple que possible, des informations relatives à la physique, au génie climatique et les fondamentaux concernant l'air conditionné.

Ce rapport vous permettra de « tordre le cou » à un certain nombre d'idées reçues ou préconçues concernant le chauffage et surtout d'avoir une vision plus claire sur la manière d'avoir un chauffage efficace, confortable, et le moins coûteux possible. A travers les nombreux moteurs de recherche disponibles sur Internet, vous pourrez facilement trouver des informations pour compléter votre connaissance sur les points qui vous intéresseront en particulier.

Ce rapport de recherche sera édité dans de nombreuses versions, dépendant des retours des lecteurs, mais aussi de réévaluations et mise à jours ultérieures des données ayant servi à le rédiger. Les questions, suggestions, critiques et propositions permettant l'amélioration de futures versions sont tout à fait bienvenues. Le traducteur se fera un plaisir de les traduire et les faire suivre au Docteur en Ingénierie Peter Kosack, directeur de recherche ayant réalisé cette étude.

Table des matières

1 Introduction

- 1.1 Rappel sommaire de la définition du but du chauffage
- 1.2 Motivation de cette étude
- 1.3 Informations fondamentales indispensables à la bonne compréhension cette étude et de son interprétation
 - 1.3.1 Informations fondamentales sur la gestion énergétique et sa durabilité
 - 1.3.2 Informations de base sur la technologie du chauffage
 - 1.3.3 Les aspects médicaux
 - 1.3.4 Les flux d'énergie d'un système de chauffage : énergie primaire, énergie secondaire, énergie finale, énergie utilisable
 - 1.3.5 Classification des systèmes de chauffage par sources d'énergie
 - 1.3.6 Classification des systèmes de chauffage par mode de chauffage
 - 1.3.7 Formes spécifiques des éléments et surfaces de chauffage
 - 1.3.8 Le rôle de l'accumulation thermique dans les systèmes de chauffage
 - 1.3.9 Classification des chauffages infrarouges

2 Travaux connexes

3 Stratégie de la recherche mise en oeuvre.

- 3.1 Les systèmes considérés
- 3.2 Comparaison des flux d'énergie
- 3.3 Hypothèses de recherche
- 3.4 Le bâtiment étudié
- 3.5 Dispositif expérimental : l'installation et les instruments de mesure
- 3.6 Tests réalisés

4 Résultats et analyse

- 4.1 Le résultat des mesures
- 4.2 Comparaison de la consommation d'énergie totale pour la période d'expérimentation

5 Interprétation des résultats

- 5.1 Interprétation du point vue de la consommation d'énergie
- 5.2 Interprétation du point vue du coût
- 5.3 Interprétation du point de vue durabilité/écologie
- 5.4 Interprétation du point de vue médical et bien être
- 5.5 Remarques critique concernant le contenu sites Internet et des arguments publicitaires utilisés dans les brochures des fabricants

6 Conclusions et perspectives futures

7 Sources d'information et références

Appendices

- Annexe A: Tableaux
- Annexe B: Images

1 Introduction

1.1 Rappel sommaire de la définition du but du chauffage

Le chauffage est généralement utilisé pour maintenir la température intérieure des bâtiments dans une limite supportable par les humains et leur permettre de survivre quelque soient les baisses de températures extérieures. C'est primordial dans des zones géographique où la température extérieure descend nettement en dessous de 20°C.

Le terme « saison de chauffage » a été défini dans ce but. Le terme « saison de chauffage » décrit la période durant laquelle un système de chauffage est mis en œuvre afin de maintenir la température intérieure autour de 20°C. La référence est en Allemagne lorsque la température moyenne extérieure est inférieure ou égale à 15°C, ce qui constitue la limite de chauffage.

Il n'y a pas de loi concernant la « saison de chauffage » parce que le besoin de chauffage et sa quantité dépendent des conditions climatiques, de la situation géographique, de l'altitude, du niveau d'isolation des bâtiments, et que ces éléments dépendent de la localisation. Il est même possible, dans certains cas extrêmes, d'isoler des bâtiments tellement bien qu'aucun chauffage n'est nécessaire, même dans des zones où la température descend en dessous de 0°C, et que la seule chaleur générée par l'utilisation soit suffisante.

Les niveaux d'isolation moyens, notamment pour ce qui concerne leur efficacité dans le temps, se situent bien en dessous de cette limite. En moyenne, le chauffage représente 76% des besoins domestiques en énergie (Voir figure 1.1). De ce fait, un système de chauffage qui rempli sa fonction avec un maximum de stabilité, d'efficacité et à pour un coût attractif est essentiel.

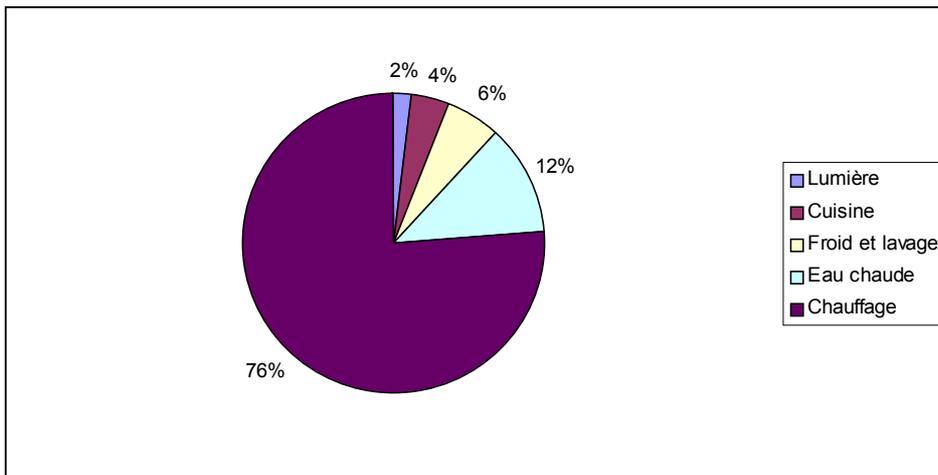


Figure 1.1: les besoins domestiques d'énergie
(Source [Http://de.wikipedia.org/wiki/Energieeinsparung](http://de.wikipedia.org/wiki/Energieeinsparung))

1.2 Motivation de la présente étude

La motivation était de définir si un chauffage à infrarouge offre une solution réaliste aux problèmes de chauffage, et de répondre aux questions suivantes :

- Est il adapté comme mode de chauffage des immeubles résidentiels ?
- Les coûts sont ils compétitifs en comparaison des autres systèmes de chauffage ?
- L'impact écologique est il compétitif en comparaison des autres systèmes de chauffage ?
- Est ce utilisable dans la pratique ?
- Est ce valable sans limitations et qu'advientra t il si tout le monde commence à l'utiliser ?

Ces questions ont déjà fait l'objet d'une étude « construction de maisons écologiques » par la même équipe durant les années 1994 - 1996. Elle examinait la pertinence d'utiliser des radiateurs infrarouges du type fil chauffant enroulé autour d'un support de porcelaine (radiateurs de salles de bain et d'églises) dans une maison à basse consommation d'énergie. En raison de la différence évidente entre les prix du pétrole/gaz et celui de l'électricité, l'étude fut interrompue prématurément. En dehors de cela, le design et la forme des radiateurs utilisés à ce moment était inapproprié comme seul mode de chauffage.

Avec le changement des prix de l'énergie et l'apparition sur le marché de radiateurs plats pouvant fonctionner en permanence pratiquement sans usure, le sujet devait être ré examiné.

Premièrement, une recherche fut conduite sur Internet afin de sélectionner des radiateur infra rouge plats utilisables. Les critères de sélection principaux étaient la disponibilité de radiateurs infra rouge (1), une température de surface comprise entre 60°C et 120°C (plus de 50% de radiations infra rouge pure), et pas de système d'accumulation (réaction rapide à l'allumage comme à l'extinction)

En conséquence, le fabricant du produit sélectionné fut contacté et un accord de recherche en coopération fut conclu.

(1) Il est nécessaire, concernant ce point, de préciser que l'objet de l'étude ne consiste pas en un test comparatif de produits ou de fabricants, mais d'une étude générale portant sur la capacité de la technologie des radiateurs à infra rouge, particulièrement ceux de forme plate, à être utilisés pour le chauffage des pièces d'habitation dans des zones résidentielles.

1.3 Informations fondamentales indispensables à la bonne compréhension cette étude et de son interprétation

1.3.1 Informations fondamentales sur la gestion énergétique et sa durabilité

Le terme gestion énergétique décrit toute l'infrastructure nécessaire à l'approvisionnement énergétique.

Cela inclus l'accès à des sources d'énergie, l'extraction, le stockage, le transport, la transformation et la distribution.

D'un point de vue cosmique, il existe trois sources primaires d'énergie servant de base à toute économie d'énergie, toutes les autres sources d'énergie résultent de leur transformation : Radiations solaires, gravité, et la chaleur générée par les planètes elles mêmes.

Les radiations d'arrière fond sont une quatrième source d'énergie qui n'est que théorique dès l'instant que la gestion énergétique est concernée. Les radiations d'arrière fond sont toutes les radiations électromagnétiques créées par les étoiles, galaxies, etc., dans les profondeurs de l'univers, et envoyées à notre système solaire depuis l'extérieur.

Le rayonnement solaire est généré par la fusion nucléaire du soleil. Il facilite la vie sur notre planète Terre et de très loin la plus grande source d'énergie du système solaire. De ce fait, des expériences ont été conduites en physique nucléaire afin de trouver des techniques permettant de réaliser des fusions nucléaires sur Terre pour rendre cette source d'énergie utilisable. Cependant, les problèmes techniques et physiques périphériques n'ont pas été résolus dans une large mesure, et cette source d'énergie ne sera pas disponible dans un futur proche, et est, on peut dire, une perspective plus qu'incertaine.

La gravité, qui est causée par la masse des corps célestes, peut être utilisée grâce à l'orbite de la lune autour de la Terre, par exemple, l'alternance des marées hautes et basses permet de produire de l'énergie à partir de centrale marée motrices. La chaleur de la Terre est créée par la fission du noyau terrestre. Cette chaleur peut être utilisée par des moyens géothermiques.

La figure 1.2 montre les 3 sources primaires d'énergie renouvelables utilisables et les énergies fossiles ou d'autres natures.

- 1 La fusion nucléaire du soleil produit de l'énergie électromagnétique utilisable directement ou indirectement.
L'usage direct du rayonnement solaire par transformation de la lumière du soleil en électricité ou en chaleur.
L'usage indirect du rayonnement solaire dans le cas du vent, de l'énergie de l'eau et de la chaleur géothermique comme par exemple l'eau ou la terre qui absorbent les radiations solaires sous forme de chaleur. Ou le réchauffement de l'air qui causent les vents, qui peuvent être transformés en énergie électrique par des éoliennes. L'eau réchauffée s'évapore et forme les nuages, qui à leur tour se transformeront en pluies qui alimenteront les rivières et les fleuves sur lesquels pourront être construites des centrales hydrauliques. Concernant la chaleur géothermique, les couches supérieures de la terre sont chauffées par le rayonnement solaire. Cette chaleur accumulée dans le sol pourra être récupérée en utilisant des pompes à chaleur, ou des échangeurs thermiques enterrés dans le sol.
L'utilisation indirecte des radiations solaires dans la biomasse prends place durant les phases de photosynthèse des plantes. La source d'énergie photosynthétique la plus fréquemment utilisée est le bois.
- 2 La fission nucléaire dans le noyau terrestre produit de la chaleur qui peut être utilisée de différentes manières à l'aide de dispositifs à énergie géothermale.
- 3 Les forces cinétiques résultant des forces gravitationnelles entre la terre et la lune, et qui provoquent les mouvements de l'atmosphère et mes océans.
Les mouvements de l'atmosphère contribuent à la création des forces éoliennes (les vents).
Les mouvements des océans, tels que marées hautes et marées basses, permettent de fabriquer de l'électricité en utilisant des centrales marée motrices.

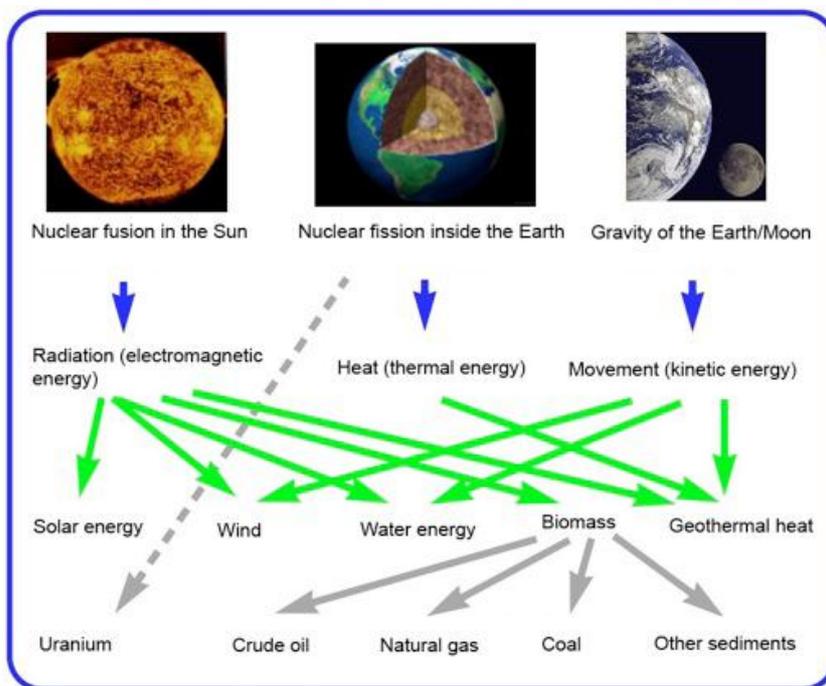


Figure 1.2 Visualisation des énergies utilisables

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

Les sources d'énergie telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel et les autres sédiments sont le résultat de la compression géologique des biomasses durant des millions d'années. Ce sont les sources d'énergie les plus utilisées aujourd'hui.

L'uranium est un cas à part. Il est utilisé pour la fabrication d'électricité dans les centrales nucléaires. C'est un des éléments radioactifs qui fournit la chaleur du noyau terrestre, et qui est extrait de mines. Dans les centrales nucléaires, l'énergie radioactive est transformée en chaleur qui sert à fabriquer de l'électricité. Dans les faits, il s'agit d'un détour technologique. La voie directe devrait être, pour extraire de l'énergie utilisable depuis l'énergie nucléaire, comme pour les autres matières radioactives, d'utiliser la chaleur géothermique directement depuis l'intérieur de la terre.

Les principaux fournisseurs d'énergie en Allemagne sont l'industrie pétrolière, les mines de charbon, les fournisseurs d'électricité et de gaz, et les centrales thermiques distantes. (Par distantes, on entend « qui ne sont pas sur le site chauffé »)

Comme on peut le voir sur la figure 1.3, la plus grosse partie de l'électricité est toujours produite à partir de sources d'énergie fossile. (Depuis la date de réalisation de cette étude, les allemands ont mis en œuvre « l'alternative énergétique » grâce à laquelle la production d'électricité à partir d'énergie renouvelables (eau, vent, soleil, biomasse) a progressé de 6,7% jusqu'aux environs de 25%. L'objectif étant d'atteindre 80% de renouvelable, 20% de fossile, et pratiquement plus de nucléaire à l'horizon 2050, *Note du traducteur*).

Depuis les années 1990, les habitations allemandes contribuent pour une part à cette évolution grâce au soutien des lois sur la gestion énergétique. (Loi sur la fourniture d'électricité, loi sur les énergies renouvelables)

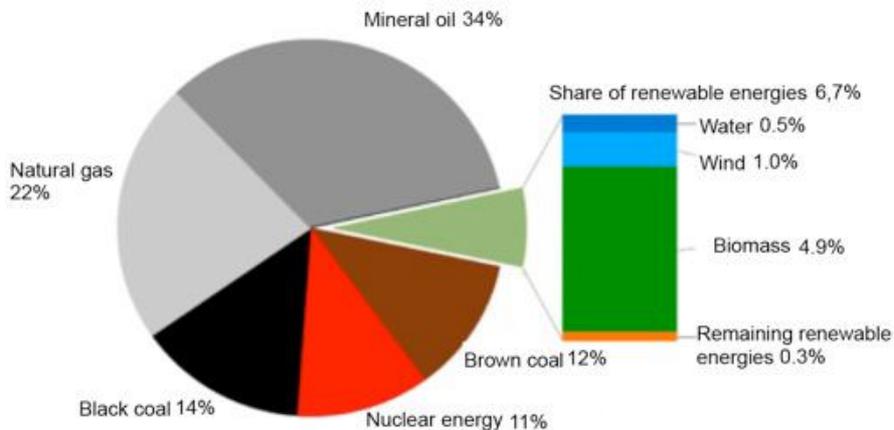


Figure 1.3 Consommation primaire de l'énergie en Allemagne

Le terme de « gestion durable » provient de la gestion forestière. Il décrit la méthode d'exploitation forestière employée pour que la quantité de bois coupée soit compensée par la quantité de bois qui repousse, afin de ne jamais atteindre une situation de déforestation totale et laisser aux forêts le temps de se régénérer.

D'un point de vue général, gestion durable signifie une manière d'exploiter une ressource de façon à préserver son intégrité et lui permettre de se régénérer par des voies naturelles. En matière de sources d'énergie, ces conditions sont seulement remplies par les énergies renouvelables, qui offrent une source permanente, au sens imagé de « qui repousse », qui n'a pas de fin du point de vue humain.

Comme conséquence de la disponibilité limitée des sources d'énergie fossiles, et de l'augmentation des effets négatifs résultant de leur usage tels que le réchauffement climatique, la pollution de

l'environnement et un coût croissant du à leur raréfaction et à leur impact social, il est impératif de modifier nos habitudes en migrant vers les énergies renouvelables aussi rapidement que possible. Cette conclusion a déjà été énoncée dans le cadre du contrat international de l'agenda 21 (entendre 21^{ème} siècle) par l'UNCED (Conférence sur l'environnement et le développement des nations unies) à Rio de Janeiro en 1992, qui a été signé par presque tous les pays du monde.

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Nachhaltigkeit](http://de.wikipedia.org/wiki/Nachhaltigkeit))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Agenda_21](http://de.wikipedia.org/wiki/Agenda_21))

Comme le chauffage représente presque les ¾ des besoins en énergie des habitations, la tâche la plus urgente est une migration rapide vers les sources d'énergie renouvelables.

1.3.2 Informations de base sur la technologie du chauffage

L'énergie thermique

L'énergie thermique (appelé aussi l'énergie calorique, chaleur) est l'énergie qui est stockée dans le mouvement subordonné des atomes ou molécules d'une substance. C'est une quantité définissable qui se mesure en une unité appelée le Joule.

L'énergie calorique et la température sont dépendantes l'une de l'autre, et suivent les règles définies par la formule suivante :

$$E_{th} = m * c * T$$

Dans laquelle E_{th} est l'énergie thermique, T est la température absolue, m est la masse, et c est la capacité thermique spécifique. La capacité thermique spécifique dépend elle même de la température, bien que cette relation ne soit pas linéaire. Il y a ce qu'on appelle des phases de transition, comme c'est le cas pour de la glace qui fond, pour laquelle une partie de l'énergie calorique absorbée est utilisée pour la fonte elle même sans augmentation de la température.

Lorsque deux systèmes ont des températures différentes, il vont s'équilibrer par transfert de chaleur de l'élément le plus chaud vers le plus froid jusqu'à être à la même température. Ce qui est appelé « équilibre thermique ».

Le transfert de chaleur peut s'opérer par conduction, convection (circulation), ou rayonnement de chaleur.

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Thermische_Energie](http://de.wikipedia.org/wiki/Thermische_Energie))

La conduction

Pendant la conduction de chaleur (appelée aussi diffusion de chaleur), la chaleur est transférée comme conséquence à la différence de température entre u solide ou un liquide par l'interaction des forces moléculaires internes. Cela se produit également quand plusieurs solides ou liquides restent en contact les uns avec les autres. Conformément à la loi de la conservation de l'énergie, il n'y aura pas de pertes durant le processus. Durant la conduction de chaleur, c'est uniquement l'énergie thermique et non les particules qui se déplacent d'un endroit à un autre.

En matière de chauffage, les effets résultant de la conduction de chaleur sont habituellement négligeable. Elle jouent seulement un rôle dans le cas de pertes due, par exemple, à une mauvaise isolation du brûleur ou des conduites.

(<http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmeleitung>)

(Recknagel, Sprenger, Schrammek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Wissensch. Vlg; Auflage 68 (1997/98) S. 135 ff)

La convection

La convection est un moyen de transfert de chaleur qui est basé sur le transfert de particules qui conduisent l'énergie thermique. En matière de technologie du chauffage, il y a convection sans échange de matière, comme lorsqu'un transfert de chaleur s'effectue d'un solide vers un liquide (eau ou air, l'air est considéré comme un liquide) qui reçoit le transfert de chaleur. Sur la zone de contact entre le solide et le liquide, il y a d'abord conduction entre la surface du solide, et les particules de liquide qui sont immédiatement au contact de la surface du solide. Le point d'équilibre entre les températures n'advient pas, les particules réchauffées ou refroidies se mettent en mouvement et se trouveront remplacées par d'autres.

Dans un chauffage à eau chaude, la forme la plus commune de chauffage dans les immeubles d'habitations, l'eau est le moyen de transfert de chaleur par convection à l'intérieur de tuyauteries formant un circuit fermé entre le brûleur et la surface intérieure des corps chauffants (les radiateurs). A l'extérieur du radiateur, le moyen de transférer la chaleur est l'air. Une convection dite « libre » s'opère alors. L'air réchauffé se dilate et grimpe, tandis que de l'air plus frais circule au niveau du sol. Les corps chauffants les plus courants, les radiateurs, peuvent être remplacés par d'autres surfaces chauffantes telles les planchers chauffés à l'eau chaude, les murs, les plafonds ou d'autres structures. La convection peut s'opérer de partout.

L'échange thermique opéré par convection entre le corps chauffant et l'air est proportionnel à la différence de température entre le corps chauffant et l'air, il est régi par la formule

$P_{HL} = w * A * (T_H - T_L)$ dans lequel w est le coefficient de transfert thermique exprimé en (W/m^2K)
 A est la surface du corps chauffant, T_H est la température du corps chauffant et T_L est la température de l'air.

La convection pour un corps chauffant donné est ainsi déterminée principalement par la différence de température entre le corps chauffant et l'air ambiant de la pièce.

Die Konvektion ist bei gegebenem Heizkörper also hauptsächlich von der Temperaturdifferenz zwischen Heizkörper und umgebender Raumluft abhängig.

(Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Wissensch. Vlg; Auflage 68 (1997/98) S. 146 ff)

(Dillmann, Andreas (2005): Karl Wieghardt: Theoretische Strömungslehre, Universitätsverlag Göttingen)

(H. Oertel (Hrg.): Prandtl-Führer durch die Strömungslehre. Grundlagen und Phänomene, Vieweg 2002 (11. Aufl))

(<http://de.wikipedia.org/wiki/Konvektion>)

Rayonnement thermique et infra rouge

Le terme « rayonnement thermique » la partie du spectre de électromagnétique qui rayonne de chaque objet dès lors que sa température diffère du 0 absolu sur l'échelle de Kelvin (0°K). Comme forme de transfert de chaleur, il n'est pas dépendant de la masse, et, contrairement à la conduction ou à la convection de chaleur, il apparaît également dans le vide. La meilleure forme connue de rayonnement thermique est le rayonnement solaire, qui peut être divisé entre les zones de rayonnement UV (ultra violets), la lumière visible, et les rayonnement infra rouges (Voir la figure 1.4)

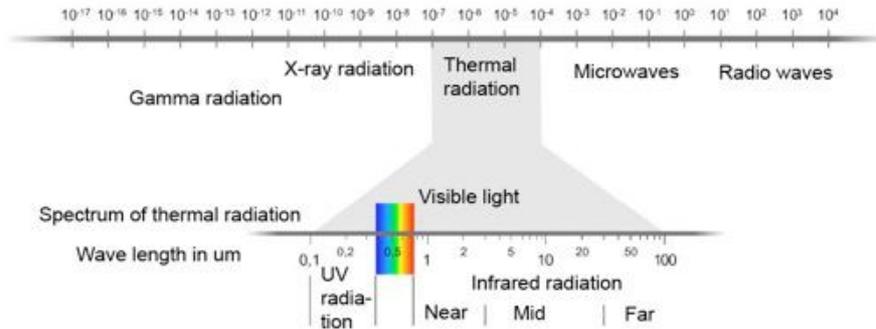


Figure 1.4 Le rayonnement thermique dans le spectre électromagnétique

La division spectrale de l'intensité du rayonnement (Spectre de rayonnement de Planck) est dépendant de la température à la surface de l'objet rayonnant. Plus grande est la température à la surface de l'objet, plus grande est son intensité maximum, et plus loin le mouvement maximum se déplacera vers les longueurs d'onde courtes.

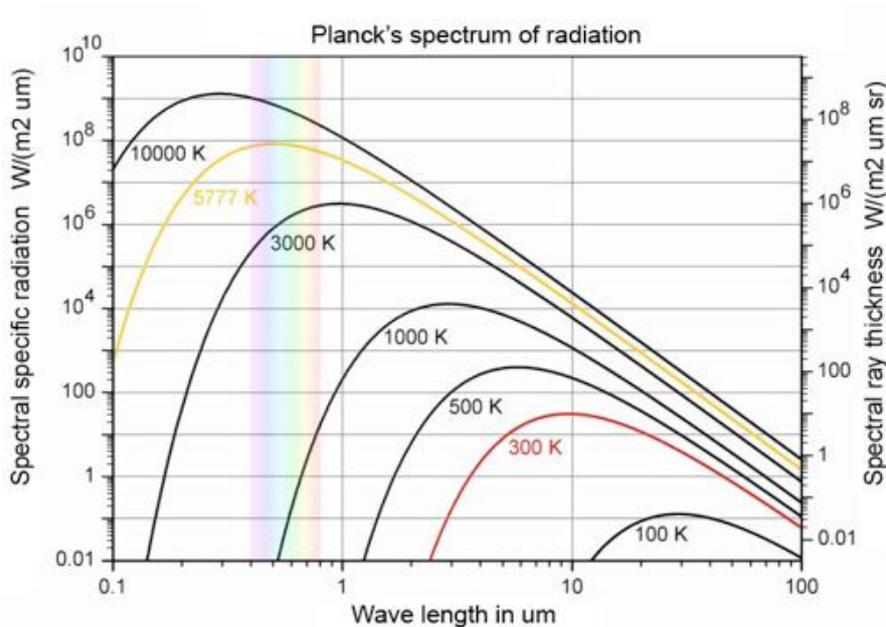


Figure 1.5 Le spectre de rayonnement sur un corps noir parfait

La figure 1.5 montre les spectres idéaux sur un corps appelé «corps noir». A titre d'exemple, le rayonnement d'un corps humain (300 Kelvin, en rouge sur le graphique) et le soleil (5777 Kelvin, en jaune sur le graphique) peuvent être mentionnés. L'idéalisation du « corps noir » signifie que le spectre concerné sera complètement déchargé. En réalité, il n'existe que ce qu'on appelle des « corps gris » sur lesquels le rayonnement est évalué à l'aide du coefficient ϵ ($0 < \epsilon < 1$). La valeur ϵ , de toute manière, s'approche de 1 pour la majorité des bâtiments. Donc, il n'y a pas de différence marquée entre un corps noir et un corps gris dans la pratique.

Il est important de ne pas confondre le coefficient de rayonnement avec l'efficacité de rayonnement du radiateur infrarouge. C'est une erreur fréquente lors d'une évaluation des informations techniques des produits proposés sur le marché. Le coefficient de rayonnement évalue l'émission de rayonnement du radiateur infrarouge proportionnellement à l'émission d'un corps noir idéal, l'efficacité (rendement) du rayonnement est ratio de rayonnement émis par rapport à la quantité d'électricité.

(siehe auch: Fröse, H.-D.: Elektrische Heizsysteme, Pflaum Verlag 1995, 23ff)

En accord avec la loi de Stefan-Boltzmann, l'intensité totale du rayonnement d'un corps est :

$M = \sigma * T^4$ (Loi de Stefan-Boltzmann), dans laquelle $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (Constante de Stefan Boltzmann) et T = la température absolue de la surface du corps.

Par conséquent, l'intensité totale de rayonnement augmente de façon importante en suivant un facteur 4 de la température (T^4). Pour chaque m² de sa surface, le soleil a une puissance de rayonnement 400 fois supérieure à celle d'un corps humain, même si la température est seulement un peu plus de 19 fois supérieure.

L'idéalisation est également utilisée en premier dans la loi de Stefan-Boltzmann. Cela s'applique comme si le corps était seul dans l'univers. EN réalité, beaucoup d'objets s'influencent les uns les autres avec pour résultat des échanges mutuels de rayonnement. L'énergie de rayonnement émise par un objet est partiellement absorbée et partiellement réfléchie par la surface d'un autre objet. Le volume d'énergie absorbé contribue au réchauffement et provoque un accroissement du rayonnement.

Si le rayonnement émis par un objet est, selon la loi de Stefan-Boltzmann $P = \sigma * A * T^4$, dans laquelle A = la surface de l'objet, alors il est vrai pour l'échange de rayonnement entre deux objets que :

$P_{12} = \sigma * k * (T_1^4 - T_2^4)$ dans laquelle k est l'efficacité de l'échange de rayonnement qui dépend de la taille des surfaces des objets mutuellement inclinés et des coefficients de rayonnement ϵ_1 et ϵ_2 .

L'échange de rayonnement se produit de manière continue entre tous les objets et fini théoriquement lorsque toutes les surfaces de l'objet ont atteint la même température.

En pratique, dans un espace de vie chauffé, tous les éléments d'une pièce tels murs, plafonds, fenêtres, portes, mobilier personnes, animaux, etc.. se comportent comme des surfaces émettant des rayonnements. Comme les éléments chauffants, ou surfaces chauffantes sont à la plus haute température et fournissent continuellement de l'énergie, la température de toutes les autres surfaces devrait s'élever jusqu'à ce que toutes les surfaces de la pièces atteignent la température des surfaces chauffantes.

Parmi la totalité du spectre de rayonnement thermique, seuls les rayonnements infrarouge jouent un rôle dans la technologie du chauffage. On les appelle souvent rayonnements thermiques par simplification, alors que le rayonnement infrarouge n'est en fait qu'une partie du rayonnement thermique.

Selon la norme DIN5031, le chauffage infrarouge est divisé en bandes de longueur d'ondes. IR-A (0,78 μm à 1,4 μm), IR-B (1,4 μm à 3,0 μm) et IR-C (3,0 μm à 100 μm). Qu'est ce qu'un μm

Commentaire [G1]:

Une autre classification parle de rayonnement infrarouges proche, médian, ou distant, ce qui est habituel en géologie (Voir figure 1.4). Les rayonnement infrarouge distant et IR-C sont les mêmes. C'est dans cette gamme de rayonnement infrarouge que se situent les rayonnement infrarouge utilisés dans cette étude.

L'absorption du rayonnement thermique par l'air .

En dehors du transfert d'énergie entre objets résultant des échanges de rayonnement, le transfert de l'énergie d'un objet vers un liquide dans lequel il est plongé fonctionne également, à travers l'absorption des rayonnement émis dans le liquide. En technologie du chauffage, l'absorption du chauffage infrarouge par l'air fonctionne, mais dans une proportion notoirement plus faible que par convection.

Le degré d'absorption en fonction de la longueur d'onde est montré dans la figure 1.6.

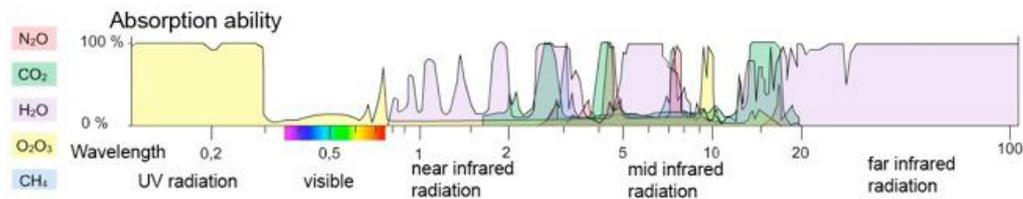


Figure 1.6 Spectre d'absorption des rayonnements par les différentes composantes de l'air. (N₂O = Azote, CO₂ = gaz carbonique, H₂O = eau/humidité)

Il est facile d'observer qu'une grande quantité de rayonnement infrarouge peut être absorbée par l'humidité contenue dans l'air.

En dehors de cela, une zone de perméabilité peut être observée dans 7 μm à 13 μm , zone dans laquelle les infrarouges peuvent se disperser dans l'air sans pratiquement aucune restriction. Les zones d'absorption par l'ozone, le gaz carbonique et l'azote figurant dans le schéma n'ont aucune influence dans une habitation résidentielle. La maximum de rayonnement d'IR-C (far infra red) se situe idéalement dans cette zone de perméabilité de l'air. Du fait de la limite basse à 7 μm , la température de surface du radiateur ne doit pas excéder 120°C. Du fait de la limite haute à 13 μm , la température minimale de la surface du radiateur ne devra pas être inférieure à 60°C, afin que le rayonnement reste supérieur à la convection

([Http://www.webgeo.de/beispiele/rahmen.php?string=de,1,k_304,1,; ;;](http://www.webgeo.de/beispiele/rahmen.php?string=de,1,k_304,1,; ;;))

([Http://www.ikg.rwth-aachen.de/planck/planck1.html](http://www.ikg.rwth-aachen.de/planck/planck1.html))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz](http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Körper](http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Körper))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotstrahlung](http://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotstrahlung))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmestrahlung](http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmestrahlung))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsaustausch](http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsaustausch))

([Http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/Strahlungsaustausch%20-%2020Wikipedia.htm](http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/Strahlungsaustausch%20-%2020Wikipedia.htm))

(Baehr, H.D., Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin 2004)

Sensation de confort (thermique)

Dans les technologies de chauffage et de conditionnement d'air, la sensation de confort (thermique) fait référence à la température ambiante et à l'état de l'air dans lesquels une personne se sent le plus confortable. Les termes de « sensation thermique » et « température de confort thermique » ont été également créés.

Sensation thermique et température de confort thermique

L'objet d'un système de chauffage n'est pas seulement de faciliter la survie lorsque les températures extérieures sont basses, mais aussi de contribuer à une sensation de confort dans la pièce. Ce qui est connu comme la « sensation thermique » et la « température de confort thermique » correspond à des quantités définies mesurées objectivement. Ces dernières sont le sujet concerné par les normes DIN 33403, DIN EN ISO 7730 et DIN 1946. La « température de confort thermique » est un terme subordonné à la « sensation thermique » et est déterminé selon des paramètres pré sélectionnés, standardisés, psychologiques et personnels concernant la « sensation de confort thermique » à l'intérieur. Désignée comme Norme DIN EN ISO 7730, elle définit un niveau de satisfaction égal à au moins 90% pour un échantillonnage représentatif d'individus. La « sensation thermique » et la « température de confort thermique » sont dépendants de :

- La température de l'air dans la pièce
- La température de rayonnement de l'environnement
- La distribution de la température de l'air (couches d'air)
- La circulation de l'air
- Et l'humidité relative de l'air.

Une explication exhaustive de ce sujet peut être trouvée dans

(Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Wissensch. Vlg: Auflage 68 (1997/98) S. 50 ff)

Température de l'air dans une pièce

La température de l'air dans une pièce est une quantité physique qui définit l'état de l'air dans la pièce. Il est exprimé en degré Celsius (°C) ou en degrés Kelvin (°K). Dans la présente étude, nous utilisons des degrés Celsius, les différences de températures sont elles données en degrés Kelvin. La température de l'air dans une pièce établit indirectement la somme d'énergie thermique qui va interagir avec l'environnement de la pièce et les objets ou personnes qui se trouvent dedans. Cela se produit lorsqu'il y a une différence de température avec l'air, survenant par conduction de chaleur depuis le côté le plus chaud vers le côté le plus froid.

Physiologiquement, la conduction de chaleur depuis le corps humain vers l'air se ressent comme un refroidissement, à l'inverse elle se ressent comme un réchauffement.

([Http://de.wikipedia.org/wiki/ Temperatur](http://de.wikipedia.org/wiki/Temperatur))

Température de rayonnement de l'entourage

La température de rayonnement d'un environnement est la température moyenne des surfaces individuelles qui délimitent la pièce (murs, plafonds, sols, portes et fenêtres, surfaces des radiateurs). Il est composé de la somme des produits des différentes surfaces par leur température, sur la somme des surfaces individuelles.

$$t_u = (\sum A_i * t_i / \sum A_i)$$

dans laquelle

A_i Surface de la surface i

t_i Température de la surface i

En relation avec la sensation thermique, il y a également le niveau de rayonnement thermique que perçoit une personne de son environnement.

Asymétries des températures de rayonnement

Lorsque les murs d'une pièce ont une différence de température de rayonnement marquée, cela peut avoir une influence sur la sensation de confort, même si la température moyenne de rayonnement de l'environnement est dans les limites considérées comme plaisante. On appelle cela « température de rayonnement asymétrique ». C'est pour cette raison qu'il n'y a aucun intérêt à utiliser des surfaces chauffante excédant 120°C, ce qui provoquerait des asymétrie marquée. Si les radiateur infrarouge sont placés de façon inadéquate, comme par exemple face à des fenêtres, l'asymétrie devient déplaisante aux alentours de 80°C. Les radiateurs infrarouges doivent ainsi être disposés sur les

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

Page 14 / 52

murs où sont les fenêtres, ou transversalement. Lorsqu'ils sont installés au plafond, ils doivent être distants d'au moins 1 mètre par rapport à la hauteur des têtes. Cela ne présente d'intérêt que lorsque dans les pièces disposent d'une bonne hauteur sous plafond, comme on trouve parfois dans les constructions anciennes.

(Gutachten über die thermische Behaglichkeit in Wohnräumen hinsichtlich elektrischer Heizflächen, Prof. Dr.-Ing. Bruno Gräff, November 2006; <http://ihs-europe.de/wp-content/uploads/2009/03/gutachten-uber-infraheat-vproffgraff-in-pdf-datei.pdf>)
(Forschungsbericht B I 5 80 01 97 – 14, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen, Optimierung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen mittels Strömungssimulation, Universität Gesamthochschule Kassel, 1999)

Distribution de la température de l'air

Pour ce qui concerne la température de l'air, seule la distribution verticale (stratification) influence la sensation thermique. Une distribution horizontale ou irrégulière va, soit ne pas se produire, soit être neutralisée par le mouvement d'air qu'elle génère.

Le terme stratification de la température de l'air signifie l'augmentation de la température à mesure que l'on s'élève au dessus du sol. La progression de la température va dépendre du mode de chauffage, de l'isolation thermique, et de la présence ou non de prise d'air sur l'extérieur.

La progression de température doit être aussi constante que possible. Les études réalisées par *(Olesen, B. W., M. Schøler et P. O. Fanger, Indoor Climate, 36 Pp. 561/579 (1979))* démontre qu'une variation de température d'un °K par mètre est perçue comme désagréable.

Circulation de l'air

La circulation de l'air est le mouvement des particules d'air se dirigeant vers un certain point de la pièce, elle est causée par les différences de pression. Elle s'exprime par la vitesse moyenne des particules d'air en m/s (mètres par seconde). La situation résultant de la présence de particules d'air plus froides que l'air ambiant, et provoquant un mouvement d'air constant dans une seule direction a une très grande influence sur la sensation de confort. Cela se nomme un courant d'air.

Selon les normes ISO 7730 et VDI 2083, une circulation d'air inférieure à 0,1 m/s (0,36 km/h) n'est pas dérangement et n'affecte pas la sensation de confort.

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Luftzug](http://de.wikipedia.org/wiki/Luftzug))

Humidité de l'air

L'humidité de l'air définit la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Comme la capacité d'absorption d'humidité par l'air dépend de la température, il y a une distinction entre humidité relative et l'humidité absolue. Plus l'air est chaud, plus il peut absorber d'humidité. L'humidité absolue de l'air est la quantité d'eau contenue dans le volume de chaque pièce (g/m³).

L'humidité relative est le ratio de la quantité d'eau actuelle par rapport à la quantité d'eau que peut contenir au maximum l'air à une température donnée. Il s'exprime en pourcentage. L'importance de l'évaporation de l'eau sur la peau dépend de l'humidité relative. La chaleur se crée sur la peau par évaporation et est évacuée par la substance évaporée. Pour une sensation de confort à une température de 20°C, une humidité relative inférieure à 30% ou supérieure à 70% joue un certain rôle (DIN1946).

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Luftfeuchte](http://de.wikipedia.org/wiki/Luftfeuchte))

Température de fonctionnement

Dans la pratique, la sensation de confort dépend de la température de l'air ambiant, de la température de rayonnement de l'environnement et du mouvement de l'air. La « température de fonctionnement » fait l'objet d'une norme (DIN EN ISO 7730) qui définit précisément les quantités des différentes composantes.

(Recknagel, Sprenger, Schrammek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Wissensch. Vlg; Auflage 68 (1997/98) S. 54)
(Forschungsbericht B I 5 80 01 97 – 14, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen, Optimierung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen mittels Strömungssimulation, Universität Gesamthochschule Kassel, 1999)

Dans le cas le plus simple , sans mouvement d'air , la température de fonctionnement T_o correspond à la température moyenne de l'air dans une pièce T_r et à la température moyenne de rayonnement du milieu de l'environnement T_u

$$T_o = (T_r + T_u) / 2$$

La température de fonctionnement optimale dépend alors essentiellement de l'activité exercée et de l'habillement des gens. Par exemple, pour un travail s'effectuant assis, habillé légèrement, une température de fonctionnement de 21,5° sera optimale.

Lors du choix et du dimensionnement d'un système de chauffage associés à un système de contrôle approprié, il suffit de remplir les conditions de températures de fonctionnement correspondant à l'activité désirée. Les impératifs pour l'air conditionné sont plus astreignants, et l'ensemble des impératifs doivent être pris en compte pour obtenir la température de confort recherchée ; cela inclus également la régulation de l'humidité de l'air.

La température de fonctionnement est représentée dans le diagramme « Température de rayonnement – Température de l'air » sous la forme d'une zone de confort thermique (Voir figure 1.7)

Les plus hautes températures par rayonnement sont en généralement perçue comme plus agréable que les plus hautes températures d'air. Les systèmes de chauffage qui produisent de la chaleur par rayonnement plutôt que par chauffage de l'air doivent être privilégiées pour la meilleure sensation de confort qu'ils offrent.

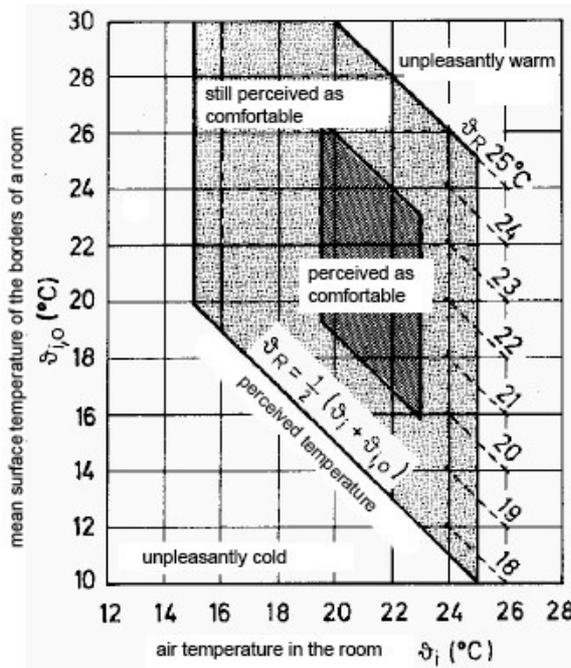


Figure 1.7 : Diagramme des sensations de confort selon le mode de chauffage (Air / Rayonnement)
 (Température de confort par rayonnement sur la droite du graphique, température de confort par convection sur la gauche du graphique, Note du traducteur)

1.3.3 Les aspects médicaux

Personnes souffrant d'asthme ou d'allergies

La plupart des personnes allergiques à la poussière domestique en souffrent à cause de la technologie de chauffage utilisée. L'allergie à la poussière domestique est due à une hypersensibilité ou des réactions allergiques aux excréments des acariens contenus dans les poussières domestiques, ce qui peut être la cause de nez coulants, démangeaisons et asthme allergique. Cette réaction du système immunitaire n'est pas causée par la poussière elle-même, mais par les excréments des acariens qui vivent dans la poussière. Ces excréments « collent » à la poussière et sont remués par toute forme de mouvement d'air. Plus le mouvement d'air est faible, mieux c'est pour une personne souffrant de ce type d'allergie. De part son mode de fonctionnement, le chauffage à infra rouge est le mode de chauffage qui génère la moindre proportion de mouvement d'air (convection).

(Wilfried Diebschlag, Brunhilde Diebschlag: Hausstauballergien. Gesundheitliche und hygienische Aspekte. 2. Aufl., Herbert Utz Verlag, München 2000)

Traitement médicaux à base de chaleur

Les traitements médicaux par rayonnement infrarouge entre dans le champ des traitements physiques et physiologiques. Ici, nous avons affaire à des formes de traitements médicaux basés sur la chaleur, les courants électriques, les rayonnements infrarouge et ultraviolet, l'utilisation de l'eau et des traitements mécaniques comme les massages. En particulier, l'usage de rayonnement IR-C, qui sont utilisés dans les saunas à infrarouge, ont fait l'objet de recherches poussées dans le domaine des douleurs, surmenage des fonctions locomotrices et les traitements de certains problèmes vasculaires. Les IR-C ont des effets médicaux et thérapeutiques positifs. En dehors de cela, c'est une composante du rayonnement dans lequel nous vivons au quotidien, parce que le rayonnement nous entoure, à bas ou haut niveau, par tous les objets nous entourant.

(Richter W., Schmidt W.: Milde Ganzkörper-Hyperthermie mit Infrarot-C-Strahlung. Z Onkol/J Onkol 34 (2002) 49 - 58)

(Schmidt W., Heinrich H., Wolfram G.: Detoxifikation und Immunstimulation durch Infrarot-C-Strahlung. Biol. Med. 33 (2004) 66 – 68)

1.3.4 Principaux flux d'énergie dans les systèmes de chauffage : énergie primaire, énergie secondaire, énergie finale et énergie utilisée.

L'énergie qui peut être trouvée sous une forme libre ou fixe dans la nature est appelée énergie primaire du point de vue de la gestion énergétique. Ces énergies incluent les formes d'énergie mentionnées ci-dessous :

- Les énergies renouvelables telles que Biomasse, hydraulique, solaire, géothermique, éolienne
- Les énergies fossiles telles que tourbes, pétrole, gaz naturel, bitumes
- L'énergie nucléaire (uranium)

Les énergies secondaires sont les sources d'énergie qui résultent de processus de dissipation ou de transformation, tels que brûlage, fission nucléaire ou raffinage. Ces sources d'énergie sont par exemple le gaz, l'électricité, les hydrocarbures, le chauffage décentralisé distant.

L'énergie finale est celle qui arrive chez le consommateur après les pertes dues à la transformation ou au transport.

L'énergie utilisable est l'énergie qui est disponible pour un usage direct par l'utilisateur final, ou après une transformation de l'énergie utilisable en un service quelconque (mécanique, chaleur, etc.). Les énergies utilisables comprennent la chaleur, le froid, la force mécanique, les ondes sonores, etc.

L'énergie utilisable est généralement inférieure au volume d'énergie finale à cause des pertes induites par la transformation de l'énergie. Par exemple, une ampoule d'éclairage produit de la lumière et de la chaleur à partir de l'énergie finale. Sa vocation n'étant pas de chauffer, la chaleur qu'elle génère est considérée comme une perte.

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Primärenergie](http://de.wikipedia.org/wiki/Primärenergie))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Sekundärenergie](http://de.wikipedia.org/wiki/Sekundärenergie))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Endenergie](http://de.wikipedia.org/wiki/Endenergie))

([Http://de.wikipedia.org/wiki/Nutzenergie](http://de.wikipedia.org/wiki/Nutzenergie))

1.3.5 Classification des systèmes de chauffage en fonction des sources d'énergie utilisées

Dès l'instant que les aspects écologiques sont concernés, il est important de classer les systèmes de chauffage en fonction de la source d'énergie utilisée, et de son origine. D'un point de vue physique, nous pouvons trouver quatre types d'énergie différents :

- Energie chimique (carburants solides, hydrocarbures, gaz)
- Energie électrique
- Energie résultant du rayonnement solaire
- Chaleur naturelle (écologique)

L'énergie solaire et la chaleur naturelle (écologique) sont des formes d'énergie renouvelables en elles mêmes. Dans les cas d'énergies chimiques ou électriques, cela dépend si la source originale d'énergie est renouvelable ou non.

Elles sont souvent d'origines mixtes. Ainsi, la part d'énergie renouvelable entrant dans la production d'électricité est actuellement supérieure à 15%, et seulement une petite partie de biogaz, de l'ordre de quelques pour cents, est ajoutée au gaz naturel. Cela varie en fonction des endroits. Les carburants solides, et hydrocarbures peuvent être totalement produite à partir de biomasses avant d'être fournies au consommateur.

La transition énergétique vers le renouvelable étant un processus relativement long s'étalant sur des décennies, la manière la plus simple de choisir un système de chauffage devrait être de prendre en considération celui qui utilise ou utilisera le plus possible d'énergie d'origine renouvelable.

1.3.6 Classification des systèmes de chauffage selon le type de chaleur générée

Chauffage indépendant

Le terme chauffage indépendant définit un système qui chauffe à partir d'énergie finale, tel gaz, pétrole, bois, charbon ou électricité, et est produit dans les habitations à partir d'un transformateur d'énergie indépendant. La source de chaleur est ainsi installée placée dans une pièce indépendante et chauffe directement l'environnement dans lequel elle est installée, indépendamment des autres pièces. La distribution de chaleur se produit également dans la même pièce. Les cheminées ouvertes, poêles, inserts, poêles en faïence, poêles à mazout ou poêles à gaz connectés directement dans la pièce sont tous des formes de chauffage indépendant, tout comme les radiateurs électriques à résistance soufflants ou non, les radiateurs infrarouge, les planchers chauffants électriques et les radiateurs électriques à accumulation.

Chauffage central

Avec le chauffage central, le système transformant l'énergie finale en chaleur est situé à un emplacement unique dans un bâtiment ou un ensemble de bâtiments. L'énergie thermique doit être d'abord transportée dans les différentes pièces, en utilisant un moyen comme l'eau, la vapeur, ou l'air chaud, puis diffusée dans les pièces au moyen de radiateurs ou de surfaces chauffantes.

Le mode de chauffage central le plus utilisé en Allemagne est le chauffage central au gaz, connu sous le nom de « chauffage central à eau chaude », qui utilise l'eau chaude comme moyen de

transport de la chaleur. Ensuite viennent les chauffages central à fuel, différents mode de chauffage utilisant les pompes à chaleur, et les chaudières à combustibles en granulés (bois et dérivés).

Dans cette étude, le chauffage central au gaz est comparé au chauffage indépendant par infrarouges.

Principes du transfert de chaleur dans les espaces de vie : convection et rayonnement.

Cette étude emploiera le terme de chauffage par rayonnement lorsque l'élément ou la surface chauffante transfère plus de 50% de l'énergie thermique par rayonnement. Cependant, ce n'est pas si fréquent dans la pratique (voir ci-dessous)

Cette étude parlera de chauffage par convection lorsque plus de 50% de l'énergie thermique est transféré par convection. La plupart des radiateurs disponibles sur le marché fonctionnent par convection.

A noter : Tous les radiateurs ou surfaces chauffantes transfèrent l'énergie thermique à la fois par rayonnement et par convection, et également, pour une quantité négligeable, par conduction thermique. La répartition est cruciale. Les documentations incorrectes ou incompréhensibles, à travers des sites Internet ou d'autres publications sur le chauffage, donnent souvent l'impression qu'il existe des systèmes de chauffage fonctionnant uniquement par pure convection ou par pur rayonnement. Dans la réalité, ces formes n'existent que de façon approximative, dans le cadre de très coûteuses expérimentations, et certainement pas dans l'industrie du chauffage.

Proportion de convection et de rayonnement pour les différents types de chauffage.

La proportion de convection et de rayonnement **dépend essentiellement** de la température de surface, de l'état de surface, et de la forme structurelle de l'élément chauffant.

Dans le cas de la forme la plus simple de panneau chauffant indépendant, un coefficient de rayonnement approchant 1 et une taille standard d'un demi à un mètre carré, avec une température de surface comprise entre 60°C et 70°C, les proportions de convection et de rayonnement seront similaires. Lorsque la température de surface est inférieure, la proportion de convection prévaut, lorsque la température de surface est supérieure, c'est le rayonnement qui prévaut.

Dans le cas de formes plus complexes telles que les radiateurs modulaires, les radiateurs en tubes d'acier, les radiateurs à lamelles et les panneaux convecteurs composés de différents panneaux et feuilles de métal, la proportion de convection augmente considérablement du fait de l'effet cheminée, pour des corps chauffants à haute température atteignant les 90°C, la proportion de convection peut atteindre 90%.

D'un autre côté, la proportion de rayonnement augmente avec la surface dans le cas d'une structure simple. Si la surface chauffante est plus grande que 10 m², l'équilibre entre convection et rayonnement sera obtenu avec une température en surface de seulement 45 à 50°C.

(Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Wissensch. Vlg; Auflage 68 (1997/98) S. 435 ff und S. 938 ff und S. 836)

1.3.7 Radiateurs et surfaces chauffantes de formes spéciales.

Poêles en faïence et cheminées

Les poêles en faïence et cheminée sans conduites d'air chaud ont un mode de fonctionnement très proche d'un simple panneau chauffant, résultant du fait des larges surfaces chauffantes et de la forme cubique de l'élément. Comme la température de surface approche les 80°C, c'est la forme classique de chauffage par rayonnement. Néanmoins, lorsque les poêles en faïence et les cheminées comportent des conduites d'air chaud, la proportion de convection prévaut, avec comme résultat un fort effet de cheminée.

Plinthes chauffantes

Les plinthes chauffantes sont une forme spéciale de chauffage par convection. Les plinthes chauffantes courent généralement à la base des murs extérieurs de la pièce juste au dessus du sol. Les éléments chauffants d'un plinthe chauffante consistent en un tube autour duquel sont fixées des lamelles métalliques, et dans lequel circule de l'eau chaude. Comme conséquence des lamelles, une convection locale s'opère (effet cheminée). Les plinthes chauffantes génèrent un écran d'air chaud qui monte le long des murs et des surfaces vitrées. Ainsi, les murs et fenêtres sont chauffés. La sensation de confort escomptée est générée par le rayonnement des surfaces chauffées par la couche d'air chaud. Comme la lame d'air chaud est très fine et se déplace très lentement par rapport aux autres formes de chauffage par convection, l'air contenu à l'intérieur de la pièce chauffe plus lentement et reste moins chaud que la lame d'air chaud périphérique.

Les plinthes chauffantes sont la le mode de chauffage par convection le plus optimisé. Pour devenir un chauffage par rayonnement, les murs et les fenêtres devraient être chauffé à 45°C par la lame d'air, ce qui évidemment n'est pas le cas.

Chauffage à grandes surfaces (Murs, plafonds et planchers chauffants)

Les chauffages à grandes surfaces sont généralement constitués de tuyaux flexibles passant dans le plafond, l'enduit des murs ou la chape du plancher. Ils sont appelés plafonds chauffants, murs chauffants ou planchers chauffants. Les surfaces chauffent par conduction thermique et ainsi assure une température moyenne de rayonnement plaisante. L'air de la pièce est réchauffé par convection douce. Cela fonctionne de la même manière lorsque les surfaces sont chauffées électriquement par le biais de résistances ou de plaques noyées dans les surfaces au lieu d'être chauffées par des canalisations d'eau chaude.

Les plinthes chauffantes et chauffages à grandes surfaces sont souvent qualifiés de chauffage par rayonnement, alors que le transfert de chaleur dans la pièce chauffée s'opère à moins de 50% par rayonnement. Cette dénomination qualifie plus l'avantage offert par ce mode de chauffage puisqu'elle procure une bonne température moyenne de l'espace chauffé par rayonnement car les surfaces chauffées le sont en partie directement, en partie par rayonnement, et en partie en créant une lame d'air chaud. Le chauffage par grandes surface serait idéal s'il maintenait toutes les surfaces qui délimitent la pièce à une température comprise entre 20 et 20°C. Ce qui veut dire qu'il n'y a pratiquement aucun échange thermique par rayonnement entre les surfaces chauffantes et le corps humain revêtu d'habits parce que les températures de toutes les surfaces seront approximativement les mêmes. C'est exactement ce qui est perçu comme particulièrement agréable. La chaleur émise dans la pièce par ce type de chauffage s'opère essentiellement par convection, et par absorption du rayonnement par l'air de la pièce.

Les avantages sont similaires à ceux obtenus dans le cas d'un chauffage opérant par rayonnement :

- Aucun besoin d'espace pour installer les éléments chauffants dans la pièce
- Pas de dépôt de poussière sur les éléments chauffants
- Peu de stratification des températures dans la pièce
- Température de l'air plus basse qu'avec la convection classique ; avec pour résultat une sensation de chaleur agréable pour les humains
- Peu ou pas de condensation d'humidité sur les éléments structurels, ce qui évite la formation de moisissures.

1.3.8 Rôle de l'accumulation dans les systèmes de chauffage

Pour le chauffage central comme pour le chauffage indépendant, la chaleur est stockée dans le système de chauffage immédiatement avant d'être transférée dans la pièce. Selon le système utilisé, la taille est proportionnelle au poids. La règle générale étant que plus il y a de masse, plus il y a d'accumulation.

Les différents type d'accumulation comprennent l'eau contenue dans le corps de l'élément de chauffage aussi bien que le corps de l'élément lui même, les briques réfractaires dans une cheminée, La chape d'un plancher chauffant, etc...

Dans le passé, lorsque les poêles fonctionnaient avec du combustible solide et qu'il n'existait pas de système de régulation de chaleur, plus la capacité d'accumulation était grande et mieux c'était. Le combustible était chargé dans le poêle une ou deux fois par jour et la chaleur accumulée fournissait une chaleur uniforme dans la pièce même lorsque le combustible était épuisé. C'était également le cas avec du gaz ou du mazout lorsque le fonctionnement était conditionné par l'ouverture d'un simple robinet.

Si le transfert de chaleur s'opère en simultanée ou presque avec la création de chaleur, la capacité d'accumulation ne joue aucun rôle.

Ce n'est plus le cas avec les systèmes modernes de chauffage à faible consommation d'énergie, qui comportent un contrôle de la température pour la maison ou pour chaque pièce, ainsi qu'une adaptation de la chaleur produite au besoin. Variation du rayonnement solaire, montée de température due à l'usage du four, ou baisse due à l'ouverture des fenêtres demandent une adaptation rapide du volume de chauffage nécessaire. Avec un chauffage à accumulation, un système de régulation ne peut qu'autoriser ou interdire l'ajout de chaleur dans l'accumulateur, il ne peut en aucun cas réguler l'émission de chaleur dans la pièce.

Lorsque le chauffage doit être fourni rapidement, le chauffage à accumulation n'offre aucune possibilité de réaction immédiate. Dans le cas de la plupart des planchers chauffants qui doivent réchauffer le volume total de la chape, le délai de réaction peut être de plusieurs heures.

A l'inverse, lorsque la pièce reçoit un apport de chaleur, du par exemple aux rayons de soleil hivernaux passant à travers une fenêtre exposée au sud, et que la fourniture de chauffage doit être interrompue, la pièce sera surchauffée, avec pour résultat une consommation inutile d'énergie thermique due à la chaleur déjà stockée dans le chauffage à accumulation. Du point de vue des techniques de régulation, cela s'appelle une surchauffe due à l'inertie du système de régulation.

Un chauffage à basse consommation comportant un système de régulation thermique doit avoir le moins possible de capacité d'accumulation dans l'élément de chauffage ou la surface chauffante, ce qui va à l'encontre de la plupart des idées reçues. La réserve de calories du chauffage central (d'une pièce) demeure ainsi intacte puisque le transfert de chaleur dans la pièce est sous le contrôle du système de régulation.

Une grande capacité d'accumulation dans un chauffage à infra rouge fait que le radiateur reste à une température comprise entre la température ambiante et 60°C pendant une longue période à chaque fois qu'il est mis sous tension ou hors tension par le thermostat d'ambiance. Ce qui signifie que le temps de chauffage ou de refroidissement est significativement plus long que 5 minutes, au lieu d'être idéalement inférieur à une minute. Pendant cette période, le radiateur à infrarouge fonctionne comme un convecteur. Les avantages du chauffage à infrarouge disparaissent lorsqu'ils comportent une grosse capacité d'accumulation. Beaucoup de ces radiateurs à infrarouge ne sont que des convecteurs avec un plus haut niveau de rayonnement.

C'est également vrai lorsque des plaques chauffantes sont installées tout près de la surface dans les murs. Bien qu'elles atteignent de hautes températures par rapport à des surfaces de chauffage classique, le mur se comporte comme un accumulateur. Au total, l'électricité transformée fournit moins de 50% par rayonnement infrarouge. Lorsqu'elles sont installées à fleur dans le sol, une lame d'air se crée en réponse à la convection sur une grande surface, de façon similaire aux plinthes chauffantes.

(<http://de.wikipedia.org/wiki/Heizungsregler>)

(<http://de.wikipedia.org/wiki/Überschwingen>)

(Otto Föllinger: Regelungstechnik, Hüthig Verlag)

(Lutz & Wendt: Taschenbuch der Regelungstechnik, Verlag Harry Deutsch)

(Fröse, H.-D.: Elektrische Heizsysteme, Pflaum Verlag 1995)

1.3.9 Classification des chauffages à infrarouge

Seuls les chauffages répondants aux caractéristiques suivantes sont considérés comme des chauffages à infrarouge ; L'appareil de chauffage est indépendant, il chauffe par rayonnement, ce qui

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

Page 21 / 52

signifie que plus de 50% de l'énergie thermique émise dans la pièce s'opère par rayonnement, et le volume maximum de rayonnement se situe dans la gamme de rayonnement infrarouge (ce qui s'applique aussi aux radiateurs à infrarouge visibles comme ceux émettant une lueur rouge). Le rayonnement infrarouge émis correspond au rayonnement infrarouge naturel des rayons du soleil au dessous de la longueur d'onde visible.

Chauffage infrarouge au gaz

Les chauffages infrarouge au gaz, communément appelés chauffage d'espace, fonctionnent avec du gaz liquide, dans l'industrie ou en camping, en usage stationnaire, ils utilisent également du gaz naturel, mais c'est plus rare. La flamme du gaz chauffe l'enveloppe chauffante. Les chauffages d'espace industriels peuvent être utilisés comme unique source de chauffage pour des gros volumes (hall d'usine, etc.). Des mesures de sécurité spéciales doivent être mis en œuvre pour les chauffages d'espace au gaz. De ce fait, ils ne sont pas appropriés à l'usage domestique. Depuis quelques années, des chauffages de terrasses (appelées radiateurs champignons) sont de plus en plus utilisés pour chauffer des espaces extérieurs comme les terrasses de cafés. Il ne sont pas appropriés non plus pour un usage domestique.

Les chauffages infrarouge au gaz sont des radiateurs à hautes températures, dans lesquels l'énergie thermique est produite par ou dans la structure du radiateur, et qui rayonnent à haute température (de plusieurs centaines à plusieurs milliers degrés Celsius). Cette forme de chauffage est utilisée pour transférer de la chaleur à bonne distance, ou à forte température. Du fait des hautes températures générées, il y a un danger d'incendie qui doit être tenu sous contrôle à l'aide des mesures de précaution appropriées.

Chauffage électrique par infrarouge

Radiateur d'espaces, radiateurs à quartz, radiateurs filtrés

Les chauffage électrique d'espaces sont aussi des radiateurs à haute température qui opèrent selon le même principe qu'une ampoule, mais habituellement à l'aide d'une résistance chauffant grâce à l'électricité, et enroulées autour d'un corps en céramique. La plupart des radiateurs d'espace à infrarouge rayonnent sur la fréquence des IR-B, et émettent une lueur rouge sombre. Les radiateurs appelés « a quartz » sont un cas spécial. Leur rayonnement maximum se situe dans la gamme de fréquence des IR-A et émet une couleur rouge vif. La spirale chauffante est contenue dans un tube de quartz se prêtant aussi bien que possible à la transmission du rayonnement. Les radiateurs à quartz ont la plus grande proportion de rayonnement (95%) de tous les radiateurs à infrarouge. Les radiateurs à infrarouge dont le rayonnement maximum se situe dans les plages A et B sont également appelés radiateurs non filtrés car leurs rayonnement produit une lumière visible.

Radiateurs filtrés

Les radiateurs dont le rayonnement maximum se situe dans la plage de fréquence C sont appelés radiateurs filtrés, car le rayonnement n'émet aucune lumière visible. Les radiateurs filtrés peuvent être alimentés au gaz ou à l'électricité. Une forme particulière de radiateur filtré utilise de l'électricité alimentant une surface de chauffe infrarouge. La température en surface se situe généralement en dessous de 150°C. Les deux types les plus courants sont faits de métal intégrant une spirale chauffante, et ceux qui utilisent une plaque de carbone fixée sur un cadre, et à travers laquelle passe du courant électrique. C'est le type à surface chauffante infrarouge qui est utilisé dans cette étude.

Efficacité du rayonnement

L'efficacité du rayonnement, définie par les normes DIN EN 416-2 et DIN EN 419-2, ainsi que par la directive (90/396/EHS), est valable pour les radiateurs infrarouge à gaz. Les deux sont décisives pour un usage rationnel et économique de l'énergie, tandis que le but est d'obtenir une efficacité du rayonnement (correspondant à la proportion de rayonnement infrarouge) excèdent le plus possible la valeur de 50%.

Pour les radiateurs à infrarouge électriques, il est nécessaire d'utiliser par analogie l'efficacité du rayonnement comme une proportion entre le volume de rayonnement émis et la consommation d'électricité, sachant que bien sur, il n'y a encore aucune norme lorsque cette étude a été réalisée.

2 Travaux connexes

La littérature scientifique concernant l'utilisation des appareils de chauffage infrarouge dans l'habitat est pratiquement inexistante car cette technologie est encore peu utilisée.

Les différents exemples de chauffage par infrarouge ont été, jusqu'à maintenant, essentiellement des bâtiments de grande taille comme des usines, des espaces semi fermés, des entrepôts de stockage, des halls d'exposition, des stations de lavage, des gymnases, des hangars à avions, des espaces agricoles comportant des stalles, des serres, des églises et des stades. La raison principale en est la nécessité de chauffer les espaces concernés sans le coût énergétique demandé par le chauffage de l'air contenu.

Il y a eu également nombre d'études conduites par des entreprises sur l'utilisation du chauffage par infrarouges utilisant principalement le gaz, pour le chauffage d'ateliers, notamment par des organisations professionnelles. Les résultats de ces recherches, bien que très détaillés, ne peuvent malheureusement être utilisés pour le secteur résidentiel qu'avec de grandes restrictions, tant les usages en sont différents. En vertu de quoi, pratiquement aucun résultats de recherches approfondies peuvent être utilisés. En matière de conclusion, seuls les chauffages électriques à infrarouge de type IR-C peuvent être utilisés comme source de chauffage dans l'habitat. La seule caractéristique commune utilisable est le d'utiliser un moyen de chauffage évitant de chauffer l'air, des économies d'énergie similaires à celle obtenues dans les bâtiments industriels pouvant être escomptées dans le résidentiel.

Différents fabricants proposant des radiateurs à infrarouge à usage résidentiel ont mené des recherches sur la consommation d'énergie potentiels avant et après le remplacement des appareils de chauffage utilisés jusqu'alors par des radiateurs IR-C. Cependant, seules les consommations finales d'énergie ont été comparées, ce qui n'a de valeur que pour des comparaisons directes avec d'autres types de chauffage électrique. Toutefois, il est question d'économie d'énergie pouvant atteindre 70%. L'inconvénient de ces études est le fait qu'elles soient limitées à certains type de bâtiment, et que les comparaisons du type avant/après peuvent être déformées significativement par des changements dans le comportement des habitants ou des situations climatiques différentes.

Parmi ces différentes études, il ne semble pas y avoir de mesures simultanées sur une longue période, avec des habitants aux comportements similaires dans des habitations similaires. Les limites des désavantages cités ci-dessus sont difficiles à estimer, ce qui n'est pas le cas pour cette étude.

3 Stratégie de mise en œuvre de la recherche.

Dans l'idée de répondre aux nombreuses questions évoquées précédemment, l'objet de cette recherche a d'abord été défini sur un plan théorique. L'étude portera sur une étude comparative entre un chauffage central au gaz et un chauffage par des radiateurs infrarouge indépendants.

3.1 Les systèmes considérés

Chauffage central au gaz

Le type de chauffage central au gaz le plus souvent utilisé dans les zones résidentielles anciennes a été choisi, avec sa chaudière à gaz située dans une cave non chauffée, le circuit de tuyaux de chauffage conduisant l'eau chaude vers des radiateurs réglés par des robinets thermostatiques et situés dans les différentes pièces. En principe, les résultats sont valides aussi pour une chaudière à mazout, dès l'instant quelle alimente le même type d'installation comportant des radiateurs à eau chaude.

La source d'énergie primaire et également finale est le gaz naturel, qui est fourni à l'habitation à travers un réseau général de conduites. Les pertes survenant entre le départ depuis les installation du fournisseur jusqu'à l'habitation sont ignorées. L'énergie utilisable est l'énergie thermique chauffant l'air des pièces de l'habitation par convection. (Voir figure 3.1). Le flux d'air créé par ce moyen génère une différence de température importante entre le sol et le plafond des pièces.

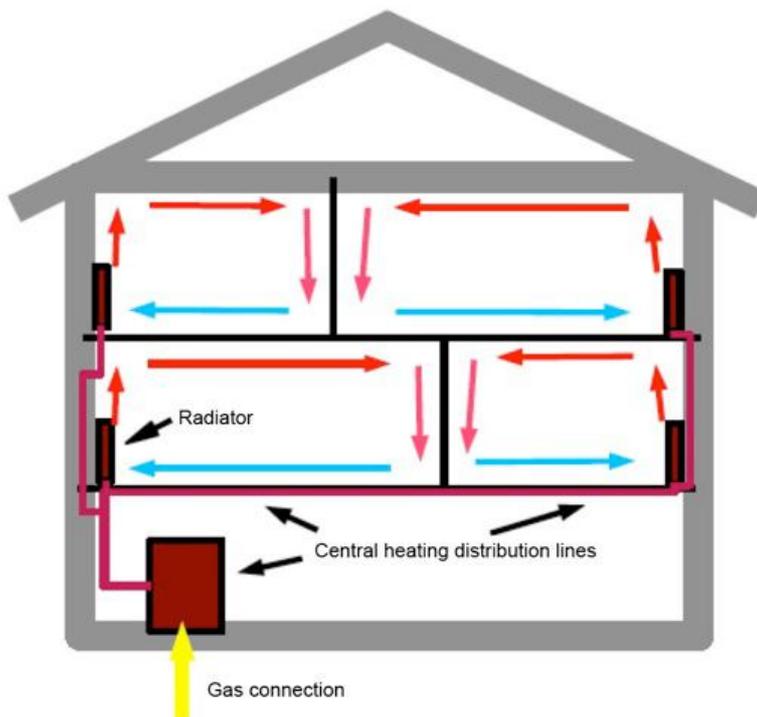


Figure 3.1: Structure de base du système de chauffage à gaz et eau chaude

Chauffage par radiateurs électrique à infrarouge

Les panneaux infrarouge sont installés indépendamment sur les murs des pièces, suspendus comme des tableaux, et ils sont reliés au circuit électrique de l'habitation. L'installation au plafond comme pour des luminaires est également une alternative (Ils ne sont pas intégrés dans le plafond)

Le réseau de distribution électrique partiellement public fait également partie du système au niveau du tableau électrique (Voir figure 3.2). Le fournisseur d'énergie primaire dans le réseau est une combinaison établissant la moyenne des différents fournisseurs d'électricité. L'énergie utilisable est l'énergie thermique du rayonnement infrarouge émise dans la partie habitable de la maison.

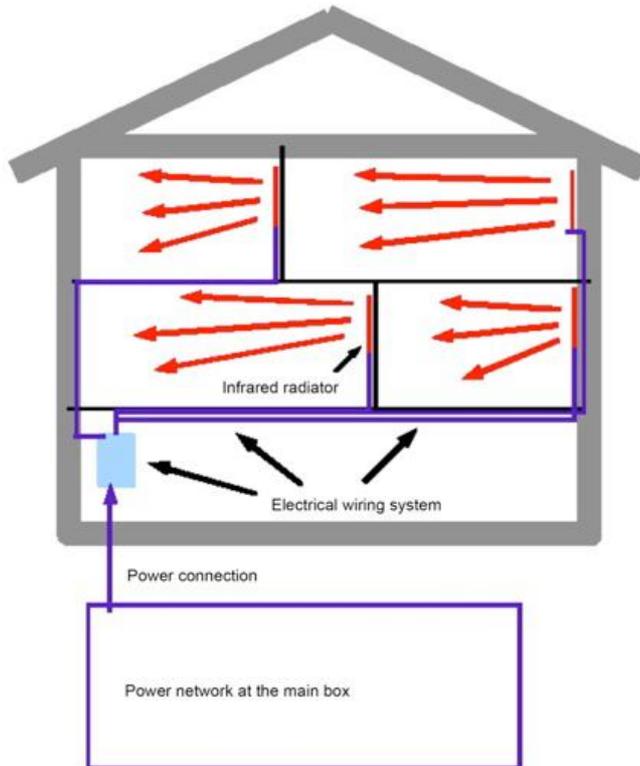


Figure 3.2: Structure de base du chauffage à infrarouge

3.2 Comparaison des flux d'énergie

Le flux d'énergie dans le système de chauffage au gaz est représenté dans la figure 3.3.

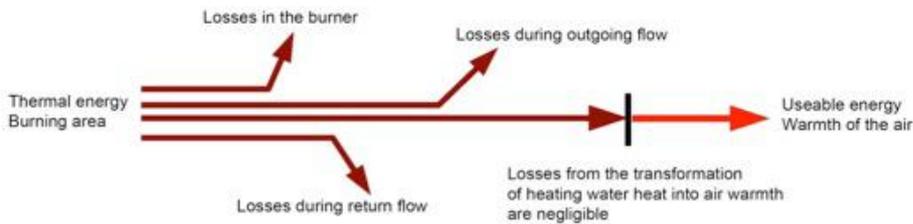


Figure 3.3: Flux d'énergie du système de chauffage au gaz

La source d'énergie primaire, le gaz naturel, est également l'énergie finale lorsqu'il est fourni dans la maison. Lors de sa combustion dans la chaudière, il est transformé en approximativement 10 kWh d'énergie thermique par m³. Une partie entre dans le circuit de chauffage via l'échangeur thermique, tandis que le reste est perdu au niveau du brûleur à travers la cave et à travers la cheminée évacuant les gaz résiduels issus de la combustion à l'extérieur.

Les tuyaux du circuit d'eau chaude assurant l'aller vers les radiateurs des différentes pièces et le retour vers la chaudière sont fixés sur les murs et plafonds, et sont plus ou moins bien isolés, et chauffent les matériaux environnant par l'intérieur. Une petite proportion de l'énergie thermique est ainsi diffusée dans les pièces par les murs. Une partie substantiellement plus grande est perdue à travers les murs extérieurs car l'écart de température en direction de l'extérieur est plus important en hiver. En dehors de cela, ce qu'on appelle des pertes de chaleur en ligne adviennent par la face des tuyauterie situé du côté du mur extérieur dans un vieux bâtiment résidentiel. Des pertes de chaleurs interviennent également durant l'aller et le retour de l'eau dans le circuit de chauffage. L'énergie thermique restante devient de l'énergie utilisable lorsqu'elle est transférée dans l'air des pièces à travers des radiateurs. La chaleur de rayonnement des radiateurs, qui est délivrée en simultanément depuis les radiateurs (rayonnement infrarouge) peut être ignorée, car ne constitue qu'un pourcentage minime de l'énergie thermique totale transférée, et qu'elle chauffe également l'air de la pièce. Les objets contenus dans la pièce, ainsi que les surfaces qui la délimitent (sol, murs, plafonds) chauffent l'air de la pièce par convection. Néanmoins, la température de l'air dans la pièce est généralement plus haute que la température des surfaces. Dans les vieux immeubles résidentiels, particulièrement lorsque la chaudière est vieille, des pertes interviennent pour cause de mauvaise isolation au point que moins de 50% de l'énergie primaire devient de l'énergie utilisable dans l'air de la pièce.

Le flux d'énergie dans le système de chauffage par infrarouge est montré sur la figure 3.4.

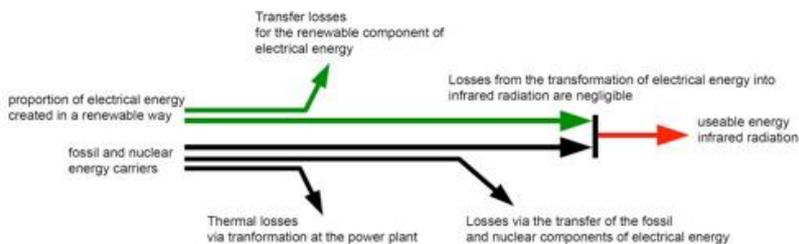


Figure 3.4 Flux d'énergie dans le chauffage par infrarouges

La source d'énergie primaire distribuée dans le réseau électrique est composée pour une part d'électricité produite en utilisant des énergie renouvelables, et d'autre part par de l'électricité produite au moyen de combustible fossiles ou nucléaires. La répartition entre les deux n'est pas définie car elle n'a aucune influence dans la comptabilisation à venir.

De l'énergie électrique et thermique résulte des centrales utilisant des carburants fossiles et nucléaires, bien que l'énergie thermique soit habituellement dissipée dans l'atmosphère comme perte.

En moyenne, 10% de l'énergie électrique est perdue entre la centrale et le tableau d'entrée de la maison.

Dans la maison, l'électricité entrante est transformée en énergie thermique rayonnante (rayonnement infrarouge) par les radiateurs à infrarouge comme énergie utilisable et rayonne directement des les espaces habitables. Le réchauffement direct de l'air, comme dans le cas des radiateurs, peut être ignoré. Relativement peu de convection est générée. Le rayonnement infrarouge réchauffe principalement la surface des murs, sols, plafonds et objets de la pièce. Une petite proportion du rayonnement infrarouge est absorbée par l'air et le chauffe directement. Autrement, l'air est réchauffé indirectement à l'aide des surfaces sur lesquelles aboutissent les rayonnement infrarouges, à travers de grandes surfaces, et une très faible proportion de convection. Du coup, les surfaces de la pièce sont généralement plus chaudes que l'air.

3.3 Hypothèse de l'étude

La différence la plus importante entre les deux flux d'énergie est que dans le cas du chauffage infrarouge, il n'y a pas de pertes entre le tableau d'alimentation général de la maison et l'énergie finale produite. En dehors de cela, le rayonnement infrarouge est plus adapté que le chauffage de l'air pour fournir une température confortable dans la pièce (le mot clé est « température opérationnelle »).

Le coût du type d'énergie qui est fourni (énergie finale) est comptabilisé au tableau d'arrivée générale de l'habitation. Il est prévu qu'une quantité d'énergie significativement plus petite, mesurée en Kwh, soit nécessaire pour la fourniture d'un chauffage confortable dans les pièces en utilisant le chauffage infrarouge plutôt qu'en utilisant le chauffage au gaz. Ce qui veut dire que pour ce qui concerne le coût d'exploitation, le chauffage par infrarouge aussi cher, voir moins cher que le chauffage au gaz, en prenant en considération l'évolution actuelle des prix.

En même temps, le chauffage à infrarouge peut avoir le même équilibre CO2 ou même meilleur, malgré l'intégration des pertes de la centrale à travers le réseau de distribution.

Ces hypothèses ont été suivies de très près dans la présente étude. Le but du projet était d'essayer de répondre à autant de questions que possible tout en gardant les coûts de mise en œuvre de l'étude aussi bas que possible (Voir motivation). Il est intentionnel que des questions plus spécifiques telles que les différentes formes structurelles des radiateurs à infrarouge n'aient pas été recherchées.

À l'issue de la définition abstraite du système, un bâtiment approprié à la prise de mesure fut recherché, dans lequel, autant que possible, les deux systèmes puissent être comparés, au même endroit, au même moment, avec les mêmes habitants et les mêmes types de construction. Avec ces pré-requis, il a été possible dès le début de minimiser le nombre de facteurs influents et d'aspects difficiles à suivre, tels que la météo, les différences de mode de vie des habitants et les différentes influences dues à la construction (isolation, différence de comportement, etc.) et leurs différents impacts sur le résultat de l'étude.

3.4 L'objet mesuré

Le bâtiment faisant l'objet des mesures est une maison pour 2 familles, comportant 2 étages et demi, une vieille structure typique, construite en 1930 avec des murs en grès. Des agrandissements ont été pratiqués en 1955, puis une surélévation en 1967, avec la même épaisseur de mur et les mêmes matériaux. Le sol et le plafond de la cave ne sont pas isolés.

Une rénovation partielle a été entreprise au début des années 90 avec l'isolation du toit par des panneaux de bois (12cm de laine de roche avec une feuille d'aluminium sur une face) et la conversion des combles en une chambre (Hauteur en pied de toiture de 40 cm environ) et l'installation de fenêtres à doubles vitrages dans toute la maison. Les appartements sont reliés par un escalier dans une cage fermée.

Depuis 1993, le bâtiment a été équipé d'une chaudière à gaz basse température avec des radiateurs appropriés, tuyaux de chauffage isolés, et circuits de chauffage séparés pour les 2 appartements. Le calcul des besoins en chauffage donne le même résultat au m² pour chaque appartement. Les consommations antérieures ont été mesurées par des compteurs d'énergie.

L'appartement du bas occupe 102,6m², l'appartement du dessus, directement accessible par la cage d'escalier et un hall, mesure 160,7m² de surface (chauffer, en incluant les combles aménagés. Le rez de chaussée et le premier étage ont le même découpage intérieur et la même taille de fenêtres (voir ci-dessous). Les deux appartements ont été occupés par la même famille. Durant la période d'étude, trois habitants étaient présents régulièrement.

3.5 Structure du dispositif expérimental et instruments de mesure.

L'appartement du rez-de-chaussée a été complètement équipé avec les radiateurs infrarouge suivants :

Différents radiateurs infrarouge (Knebel, www.infrarot-flachheizung.de), voir le plan d'aménagement intérieur ci-dessous.

Ce sont des radiateurs électrique IR-C avec une température de surface comprise entre 70°C et 110°C.

Pour chaque pièce :

FS20 STR2 thermostat sans fil (ELV, www.elv.com) et

FS20 ST2 interrupteurs de prise sans fils (ELV, www.elv.com)

Instruments utilisés pour la mesure des consommations d'électricité :

ENERGY CONTROL 3000 USB (VOLT CRAFT, www.conrad.de)

ENERGY SENSOR ES-1 (VOLT CRAFT, www.conrad.de)

Les radiateurs infrarouges ont été installés indépendamment les uns des autres, suspendus aux murs comme des tableaux, puis raccordés au secteur par des prises de courant standard. Les radiateurs sont du type à résistances en panneaux sans accumulation. En simultanée, la capacité de charge du circuit électrique a été réévaluée et un nouveau câblage passé sur le mur lorsque cela s'avérait nécessaire.

Les interrupteurs de prise sans fils (FS20 ST2) ont été placés entre les radiateurs et les prises murales, ils sont contrôlés par des thermostats sans fils (FS20 STR2). Le rayonnement infrarouge est de type IR-C (ondes longues, voir ci-dessus) sans lumière visible. La capacité de stockage de chaleur de ces radiateurs montés en surface est tellement petite qu'il n'y a aucun danger de se brûler si on y touche un instant. Toutefois, pour éviter des problèmes d'accumulation de chaleur, ils ne doivent pas être couverts, ni placés derrière des rideaux.

Les emplacements des radiateurs à infrarouge avec leurs alimentations sont montrés dans la figure

3.5. Leurs emplacements ont été choisis afin qu'ils soient simultanément :

- Permettre une couverture uniforme de la pièce
- Éviter un rayonnement asymétrique

- Compenser la faible température de rayonnement des fenêtres
- Eviter le rayonnement direct vers les fenêtres (qui provoque les plus grosses pertes de chaleur)

Le vitrage des fenêtres est transparent pour la lumière visible et les rayonnement infrarouge à ondes courtes. Pour les rayonnement infrarouge à ondes longues (la bande d'émission de rayonnement des radiateurs à infrarouge), elle sont imperméables (similaires à une fenêtre à panneaux noirs dans la gamme visible). Cette dépendance à la transparence selon la longueur d'onde est par exemple décisive pour ce qu'on appelle l'effet de serre (le fait que les vitres des fenêtres soit presque imperméable à la lumière Ultra Violet ne joue aucun rôle dans ce contexte). Le rayonnement infrarouge ne peut ainsi pas quitter la pièce par les fenêtres, mais sera absorbé dans une large mesure par la vitre en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement, ce qui les fera chauffer (au même titre qu'un mur). La part de rayonnement infrarouge non absorbé se réfléchira dans la pièce. Des pertes de chaleurs se produiront alors, comme dans le cas des murs, dues aux pertes par pénétration et rayonnement depuis l'extérieur de la vitre intérieure (fenêtres à doubles vitrages) et qui est plus important, pour sa surface, à cause d'une capacité isolante plus faible que pour les murs. Comme la capacité d'absorption augmente lorsque l'angle d'incidence (elle est plus grande à la perpendiculaire), l'incidence directe du rayonnement sur les vitres de fenêtres doit être évitée.

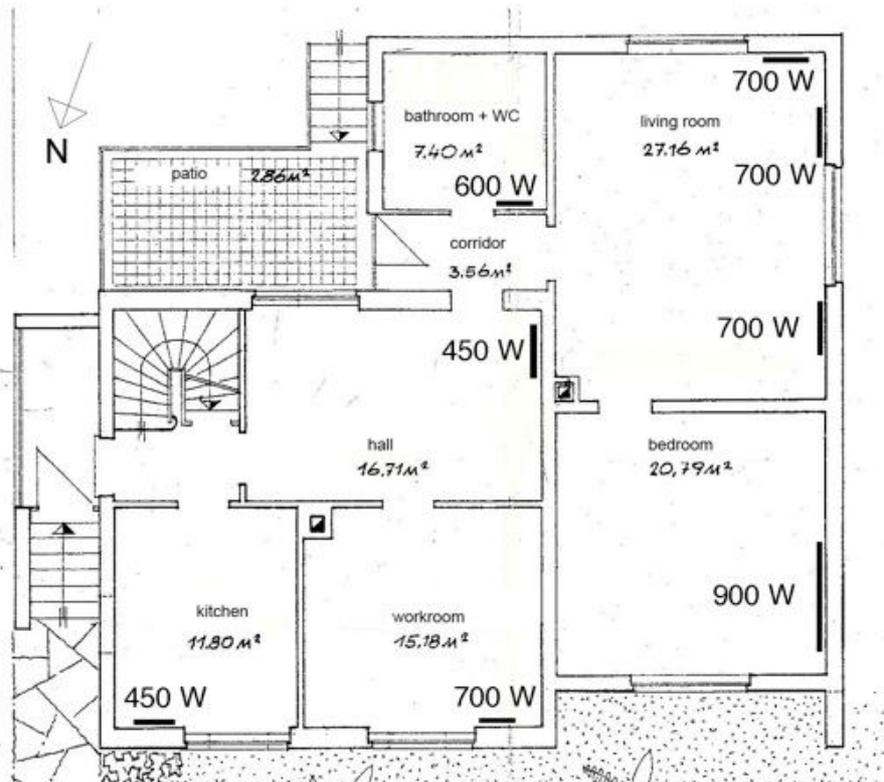


Figure 3.5 Découpage intérieur du rez-de-chaussée et positionnement des radiateurs IR-C

Les photos correspondantes sont présentées dans l'appendice

Chaque thermostat sans fil est positionné de manière à être en ligne directe avec les radiateurs (contact visuel) afin de fonctionner comme un thermomètre d'ambiance utilisé pour la mesure de la température effective de la pièce.

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

Les appareils de mesure de consommation sont doublés pour disposer d'une redondance afin de prévenir toute perte de données. Les radiateurs infrarouge sont regroupés en 4 entités mesurables et correspondant aux types de pièces.

- Groupe 1 Salle de bain
- Groupe 2 Cuisine, salle de séjour
- Groupe 3 Bureau, chambre à coucher
- Groupe 4 Salon

Les valeurs mesurées seront exprimées par groupes dans la suite de l'étude.

Des instruments de mesure portables destinés, d'une part un thermomètre hygromètre digital (AZ 8703 de ELV) destiné à la mesure de la température de l'air et de la surface des murs, et d'autre part un thermomètre à mesurer le rayonnement infrarouge (ST-8838 de ELV) sont utilisés régulièrement (au moins une fois par semaine, les jours ou la consommation de gaz était relevée) pour vérifier si la température de surface des murs est supérieure à la température de l'air dans les pièces chauffées par rayonnement infrarouge.

L'appartement du 1^{er} étage n'a pas fondamentalement changé du point de vue de son installation et de ses propriétés techniques. Peu de temps avant le lancement du projet, un nouvel accélérateur (la pompe faisant circuler l'eau chaude du circuit de chauffage) a été installé et le circuit de chauffage purgé de son air. Le circuit de chauffage du rez-de-chaussée a été condamné.

La fourniture d'eau chaude reste assurée par la chaudière au gaz pour les deux appartements.

3.6 Tests préalables aux mesures

L'installation s'est poursuivie conformément aux prévisions et, en octobre 2008, les mesures commencèrent. En premier lieu, une expérience a été menée pendant la période de test pour vérifier si la même température d'air pouvait être maintenue dans les deux appartements. Cela se révéla impossible à cause de la perception subjective de confort à la même température d'air. Aussitôt que les températures fixées sur les thermostats et mesurée dans l'air étaient identiques, la température de l'appartement chauffé au infrarouge était ressentie comme trop élevée alors que celle de l'appartement chauffé au gaz était ressentie comme confortable. A l'inverse, lorsque la température dans l'appartement chauffé aux infrarouge était ressentie comme confortable, celle de l'appartement chauffé au gaz était ressentie comme trop froide.

La raison réside dans la différence de mode de chauffage. La sensation de confort est dépendante en simultané de la température de l'air et la température moyenne à la surface des murs et des fenêtres. (voir ci-dessous)

Ainsi, les réglages des thermostats ont été ajustés de façon répétée jusqu'à ce que le même niveau de confort soit ressenti dans les deux appartements vers la mi novembre 2008. Comme les deux appartements étaient utilisés par tous les membres de la même famille, il n'y avait pas de différences comportementales des utilisateurs.

Pour obtenir la même sensation subjective de confort, la température de l'air des pièces de l'appartement chauffé aux infrarouge devait être ajustée 1 à 2 degrés plus bas que dans les même pièces dans l'appartement chauffé au gaz.

4 Résultats et interprétations

A l'issue de la période de test, les mesures commencèrent le 16 novembre 2008. Un deuxième système de mesure fut mis en place à partir du 26 novembre 2008 pour l'appartement chauffé aux infrarouge, afin que les mesures soient enregistrées deux fois et s'assurer de la précision des mesures effectuées.

Les données des mesures enregistrées pour le chauffage infrarouge ont été transférée régulièrement depuis les appareils de mesure vers une base de donnée installée sur 2 ordinateurs portables différents avec l'aide des logiciels appropriés, et des copies de sauvegarde furent également effectuées.

Dès que les chauffages a infrarouge ont été branché sur les prises murales, un wattmètre classique (mesure de l'électricité consommé/facturée) fut utilisé à des fin de suivi de la consommation électrique. En simultanément, les valeurs du compteur de gaz étaient enregistrées, et, pour en recouper les valeurs, un instrument de mesure fut utilisé pour mesurer la quantité de chaleur du circuit de chauffage du premier étage. Cependant, le calibrage de cet instrument de mesure s'avéra imprécis, et du coup, il put seulement être utilisé pour fournir des informations complémentaires approximatives permettant toutefois de contrôler l'absence d'erreurs durant la lecture des mesures.

La période de mesure s'acheva le 29 avril 2009. Ensuite, le traitement et l'interprétation des données commença.

Lors du traitement des données, les valeurs de consommation collectées à travers le double système de mesure sur l'appartement chauffé aux infrarouges ont fait l'objet d'un contrôle croisé afin de s'assurer de leur précision, puis rapprochées des quantités d'électricité consommées par l'habitation pour s'assurer de leur crédibilité.

Lorsque c'était pertinent, les valeurs relevées sur le compteur à gaz et le système de mesure de chaleur furent traités.

Toutes les données contrôlées des mesures furent ensuite transférée dans un programme de formalisation graphique pour usage ultérieur.

Résultats des mesures

Les graphiques représentant le résultat des mesures et la somme des consommations pour la complète période de mesure sont présentés dans le texte ci-après. Le détail des valeurs ayant été utilisées pour la formalisation de ces graphiques figure dans les appendices.

Consommation d'énergie du chauffage à infrarouge

Le graphique suivant montre la consommation d'énergie par groupe de pièces

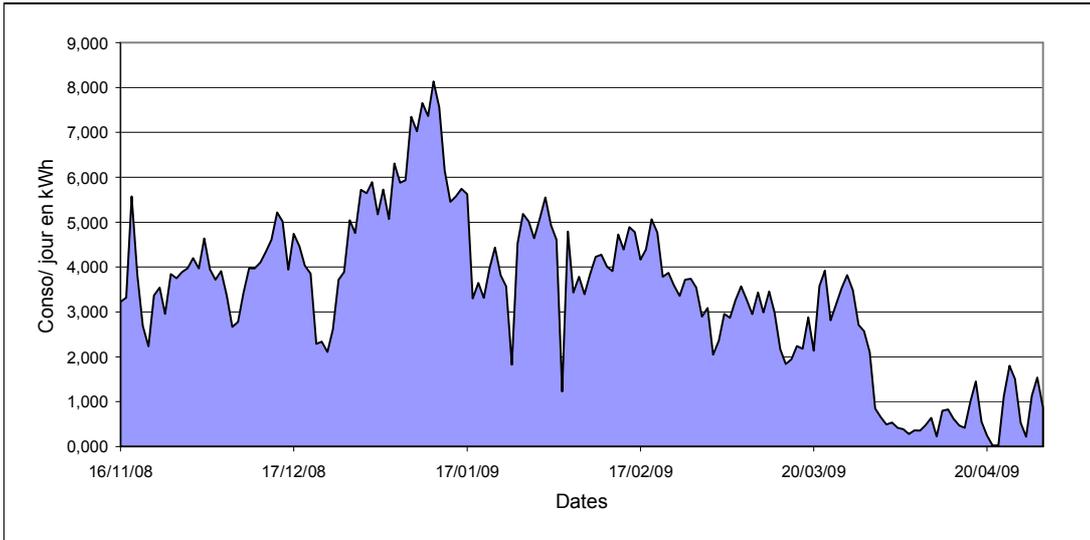


Figure 4.1 Consommation d'énergie du groupe de pièce n°1 (Salle de bain)

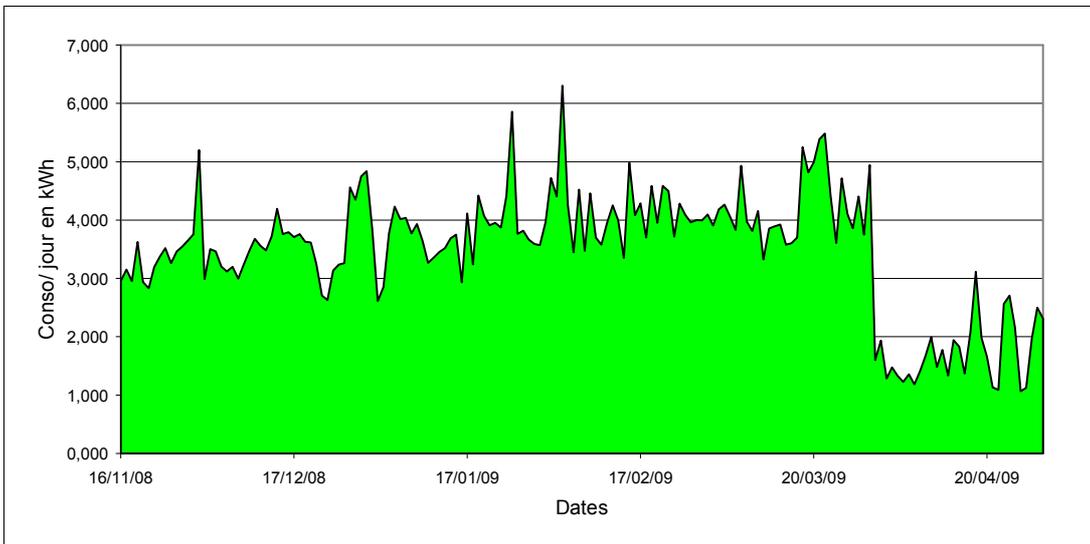


Figure 4.2 Consommation d'énergie du groupe de pièce n°2 (Cuisine et living room)

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

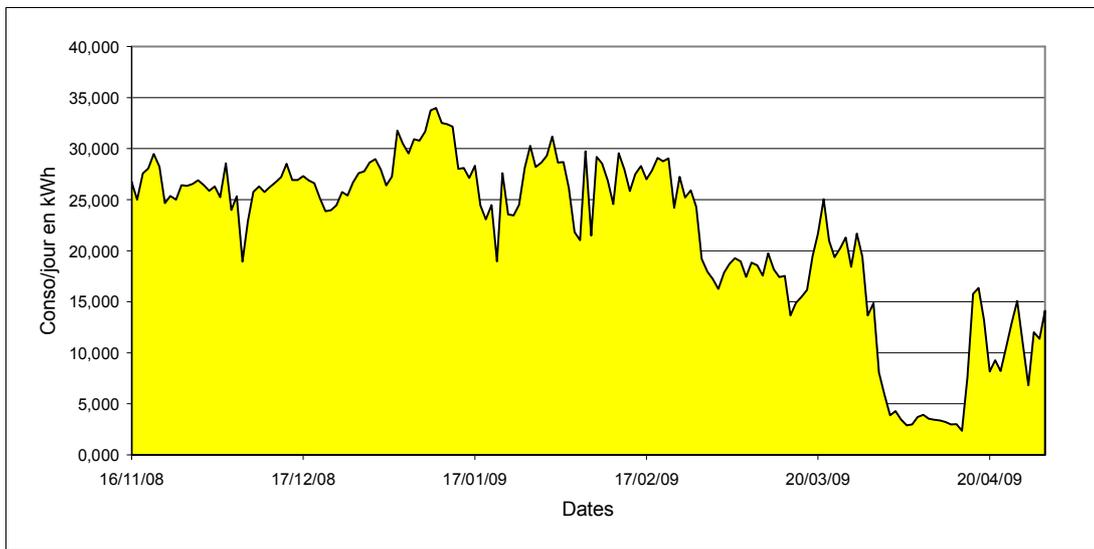


Figure 4.3: Consommation d'énergie du groupe de pièces n° 3 (bureau / chambre)

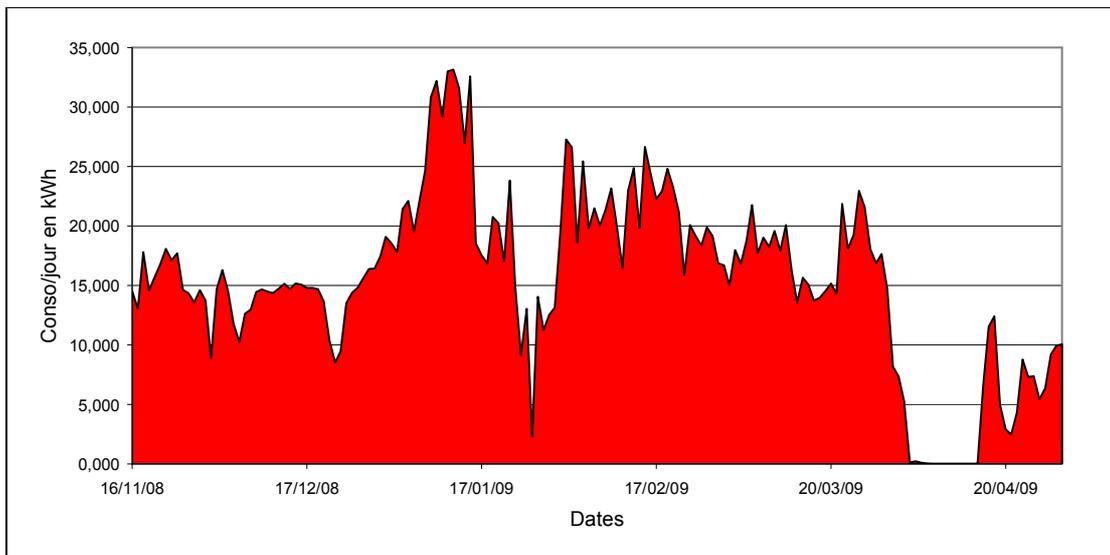


Figure 4.4: Consommation d'énergie du groupe de pièce n° 4 (salon)

La figure 4.5 montre la consommation totale quotidienne pour l'ensemble des groupes de pièces.

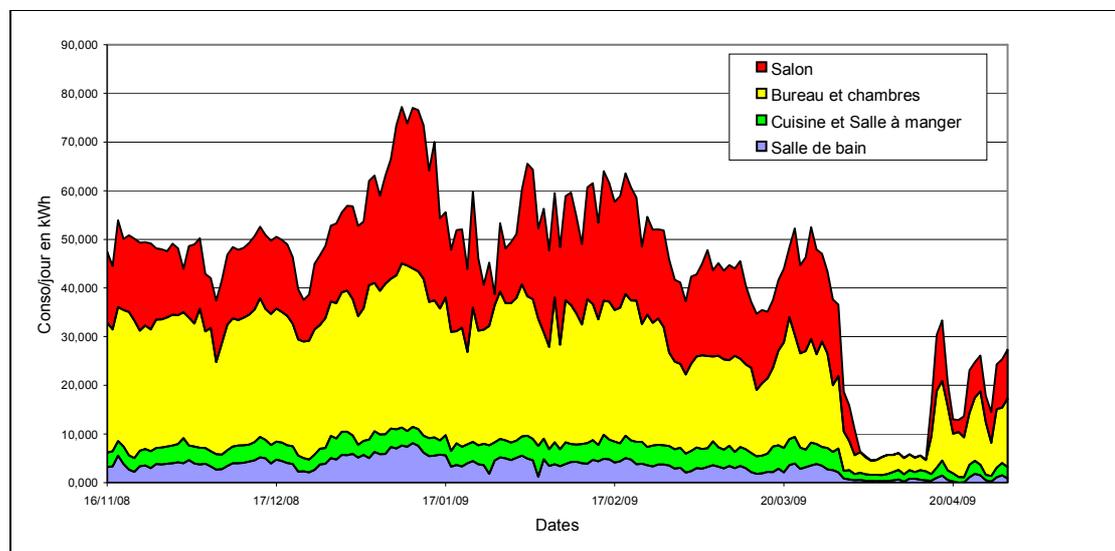


Figure 4.5: Consommation d'énergie quotidienne cumulée de tous les groupes de pièces

La consommation totale du chauffage à infrarouge pour la période de test complète, fut, après avoir été totalisée, de **7305,92 Kwh**.

Consommation d'énergie du chauffage au gaz

La consommation de gaz a été relevée sur le compteur et enregistrée chaque semaine. Le volume de gaz fut ensuite converti en énergie sur la base du coefficient $1\text{m}^3 = 10,43\text{Kwh}$

Ce relevé de consommation est illustré sur la 4.6

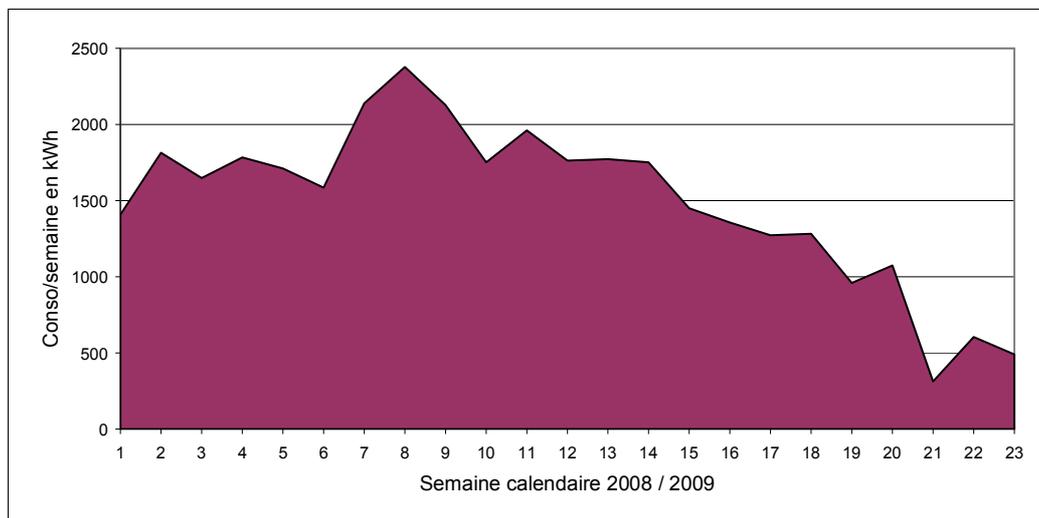


Figure 4.6: Consommation hebdomadaire d'énergie pour le chauffage au gaz

Pour rendre la comparaison plus aisée, la consommation quotidienne en énergie du chauffage à infrarouge a été ramenée à une consommation hebdomadaire (voir figure 4.7)

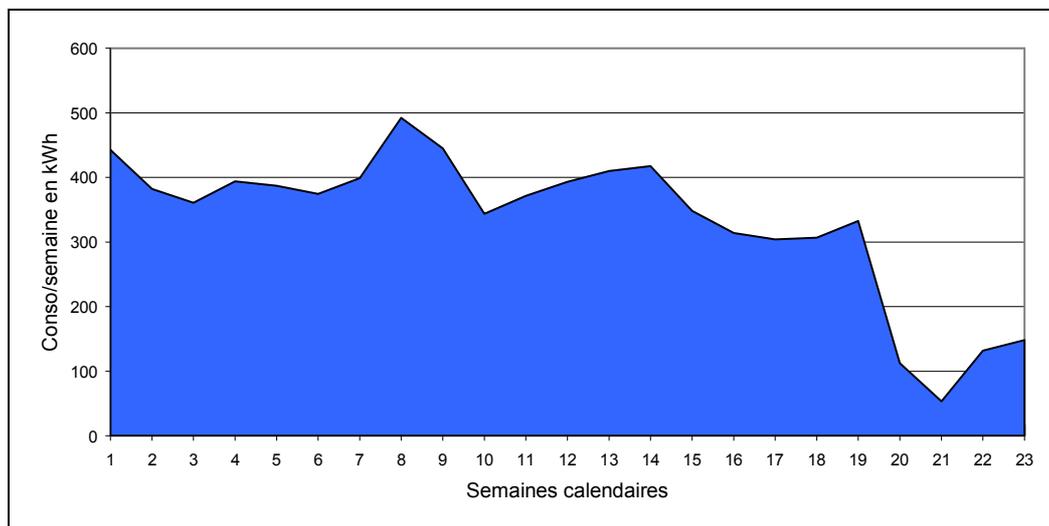


Figure 4.7: Consommation hebdomadaire d'énergie du chauffage à infrarouge

La consommation totale de gaz pour la période de référence a été établie à **34.742,33 kWh**

La mesure distincte de consommation en eau chaude sanitaire aurait demandé d'importantes modifications sur l'installation et l'idée fut abandonnée. Comme l'eau chaude fut essentiellement utilisée pour les douches, un « forfait » de 400 kWh fut alloué à chaque utilisateur pour la période de mesure de 5 mois et demi (les valeurs standards d'utilisation en ECS incluant les bains sont quantifiées entre 800 et 1000 kWh/an). Ainsi la consommation d'eau chaude sanitaire par les 3 habitants se situe à 1200 kWh pour les habitants présents régulièrement.

La consommation totale de gaz corrigée pour la période de mesure est ainsi **33542,33 kWh**.

Afin d'établir une comparaison correspondant à l'état actuel de la technologie de chauffage au gaz, le montant total de consommation de gaz fut réduit de 10%. Ce qui correspond à ce qu'aurait été approximativement la consommation de gaz en utilisant une chaudière à condensation pour le chauffage de l'habitation mesurée.

La consommation de gaz estimée pour une chaudière à condensation aurait été de **30.188,1 kWh** pour la période mesurée.

4.2 Comparaison de la consommation totale d'énergie pour la période concernée.

La consommation est proportionnelle à la surface habitable, ce qui fournit une base de calcul uniformisée pour la consommation d'énergie

De cette manière, nous obtenons les résultats suivants :

La consommation totale ramenée à la surface pour le chauffage à infrarouge durant la période de mesure était :

$$7.305,92 \text{ kWh} / 102,6 \text{ m}^2 = \mathbf{71,21 \text{ kWh/m}^2}$$

La consommation totale ramenée à la surface pour le chauffage au gaz durant la période de mesure était :

$$33.542,33 \text{ kWh} / 160,7 \text{ m}^2 = \mathbf{208,73 \text{ kWh/m}^2}$$

La consommation totale ramenée à la surface pour l'appartement chauffé au gaz en utilisant une chaudière à condensation durant la période de mesure aurait été :

$$30.188,1 \text{ kWh} / 160,7 \text{ m}^2 = \mathbf{187,85 \text{ kWh/m}^2}$$

Les valeurs de consommations ramenées à la surface sont montrées sur la figure 4.8

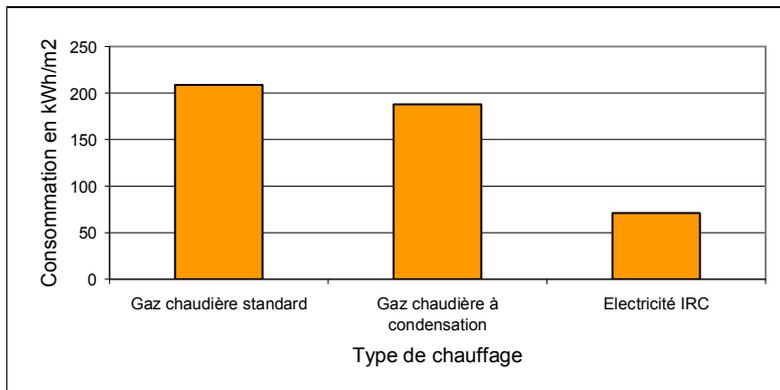


Figure 4.8 : Comparaison des consommations ramenées à la surface

Concernant le chauffage à basse température au gaz, l'énergie finale consommée du chauffage à infrarouge est seulement 34,1% de celle utilisée par un chauffage au gaz traditionnel, et 37,9% de l'énergie qui serait consommée par un chauffage à gaz utilisant une chaudière moderne à condensation. Ce qui signifie que la consommation d'énergie finale nécessaire pour se chauffer au gaz est 2,5 fois plus importante que celle nécessaire pour se chauffer à l'aide de radiateurs électriques à infrarouge.

5 Interprétation des résultats

5.1 Interprétation en terme de consommation d'énergie

En dépit des informations fournies par différents fabricants et leurs recherches internes, qui était considérées comme tendancieuse à la base, et sur lesquelles ont été définies les hypothèses de base de cette étude, la différence de consommation d'énergie finale est indiscutablement très marquée. Alors que les erreurs possibles ont été pratiquement éliminées par le choix du bâtiment et l'organisation des mesures, et parce que les habitants ont coopéré de leur mieux pour fournir un résultat fiable (sans changement d'habitudes des usagers durant la période de mesure), le résultat de ses mesures peut être considéré comme représentatif pour les immeubles d'habitation anciens.

Des différences peuvent être perçues concernant les points suivants :

- a) Il y a des pertes de chaleur non négligeables entre la chaudière au gaz et les radiateurs alors que les pertes résultant du circuit électriques sont négligeables.
- b) Il y a des pertes dans la régulation (due à l'inertie) du chauffage au gaz du fait de la chaleur accumulée dans les radiateurs. Tandis que certains des radiateurs nécessitaient plus de 10 mn pour chauffer lorsque le robinet était ouvert, et plus de 30 mn pour refroidir après la fermeture du robinet, le temps de montée en température des radiateurs à infrarouge (jusqu'à au moins 60°C) était inférieur à 4 mn et le temps de refroidissement (de 60°C à moins de 30°C) inférieur à 7mn. Le fait décisif étant que le temps durant lequel les radiateurs à infrarouge fonctionnait en convection était aussi court que possible. En dehors de cela, le concept global de régulation du chauffage pièce par pièce pour le chauffage à infrarouge sans sonde de température extérieure est substantiellement plus flexible que pour un chauffage central.
La rapidité de réaction du système de régulation peut être clairement observée dans la faible consommation enregistrée dans salon orienté au sud, les jours ensoleillés froids ou seulement frais de la fin janvier et de la période de transition au début du mois d'avril.
La suppression des pertes due à l'inertie de régulation est un des avantages principaux en comparaison des autres modes de chauffage à grande surfaces pour lesquels l'inertie est encore plus grande qu'en utilisant des radiateurs à eau comme dans cette étude. Il est probablement impossible d'atteindre l'objectif d'économie d'énergie finale désiré par ces modes de chauffage, malgré l'émission de chaleur douce.
- c) Pertes par aération comme résultat des différences de la température de l'air dans les pièces. Les deux appartement ont été aérés de la même manière disciplinée (aération simultanée et durant le même laps de temps)
- d) Pertes de chaleur par transfert (mur secs ou humides) : les pertes de chaleur par transfert vers des murs humides sont élevées dans la réalité. La basse température de la face intérieure des murs donnant sur l'extérieur lors de températures extérieures inférieures à 0°C influence les murs non isolés du fait de leur bas niveau d'isolation contre l'humidité. Un échantillonnage de mesures dans l'appartement chauffé au gaz montre que la température de surface intérieure des murs extérieurs peut atteindre approximativement 14°C. Les surfaces des murs de l'appartement chauffé aux infrarouges était maintenue à une température autour de 19°C, et leur température moyenne était toujours supérieure à la

température de l'air. Cette haute température de surface empêchant au maximum l'absorption de vapeurs d'eau par le mur.

De même, des mesures opérées dans le cadre d'autres projets démontrent une différence significative, pour le séchage des murs comme pour les maintenir secs, dans les maisons où un pare vapeur existe sur la face intérieure des murs extérieurs. La température à la surface du mur reste alors plus proche (env 1°K) sous la température de l'air. (www.hygroSan.de)

Les valeurs d'isolation d'un mur humide sont drastiquement plus basse que pour un mur sec. Un taux d'humidité de 4% fait déjà tomber le taux d'isolation d'environ 50%. En séchant les murs en contact à l'aide du rayonnement infrarouge (le séchage de bâtiments est une utilisation classique des radiateurs à infrarouges), le taux d'isolation augmente tellement que l'augmentation par transfert du fait d'un écart de température supérieur entre la surface intérieure et la surface extérieure est probablement plus que compensée.

(Ernst Vill: "Mauerfeuchtigkeit - Ursachen, Zusammenhänge, Lösungen", Verlag - Ernst Vill, Sauerlach 2002)

5.2 Interprétation en terme de coût

Le prix de l'énergie électrique

Comme base de comparaison, les tarifs habituels des quatre fournisseurs d'électricité opérants sur l'ensemble du territoire, ainsi que ceux de quatre fournisseurs d'électricité distribuant de l'électricité certifiée « 100% issue d'énergies renouvelables) ont été utilisés. Les prix peuvent varier vers le haut ou vers le bas en fonction des fournisseurs disponibles.

La tarif le plus bas (basé sur 4000 kWh pour l'été 2009) était de 19,5 cents/kWh ; le plus élevé était de 23,8 cents / kWh. Comme les prix d'abonnements pour l'ensemble des 8 fournisseurs était pratiquement égaux et négligeable au regard des coûts relatifs aux consommations, ils n'ont pas été pris en compte dans les comparaisons par coûts. (Note du traducteur : A garder à l'esprit, le prix du kWh est à ce jour en France d'un peu moins de 12 cents / kWh soit 43% inférieur au tarif moyen allemand ayant servi de base de calcul pour cette étude)

Le prix du gaz

Comme les quatre fournisseurs principaux d'électricité opèrent également dans la distribution de gaz, leurs tarifs nationaux ont été utilisés comme base de calcul dans ce comparatif. Pour le gaz également, les tarifs peuvent varier vers le haut ou le bas en fonction des fournisseurs disponibles. Le tarif le plus bas (basé sur 20.000 kWh pour l'été 2009) était de 5,0 cents/kWh ; le plus élevé était de 5,9 cents kWh. Comme les tarifs d'abonnements étaient approximativement les mêmes et négligeables, ils n'ont pas été pris en compte dans le comparatif. (Note du traducteur : A garder à l'esprit, le prix du kWh gaz ayant servi de base de calcul pour cette étude est sensiblement le même en Allemagne qu'en France)

Evolution des prix du gaz et de l'électricité

Les prix de l'électricité ont augmenté d'environ 2,5% par an sur les 10 ans passés depuis la libéralisation de marché. Les tarifs du gaz ont augmenté d'environ 7,1% par an. La relation entre le prix du gaz et du celui du mazout vont être maintenus dans le futur proche, et ces deux combustibles fossiles étant promis à se raréfier (non renouvelables). L'augmentation du prix de l'électricité a été due à 40% à des taxes gouvernementales, et les premiers signes de réductions des coûts de production d'électricité « renouvelable » comme à apparaître. L'évolution des prix de ces deux types d'énergie a peu de chance de changer dans le futur, autrement dit, le prix du gaz a toutes les chances d'augmenter plus vite que celui de l'électricité.

Partant de cela, la figure 5.1 montre l'évolution probable au regards des chiffres cités ci-dessus. La courbe bleue montre l'évolution probable du prix du gaz, tandis que la verte montre l'évolution probable du prix de l'électricité, les courbes prenant naissance en 2009.

Comme la consommation de gaz de chauffage exprimée en kWh est 2,5 fois supérieure à celle pour se chauffer aux infrarouges d'origine électriques, le prix du gaz doit être pondéré par ce coefficient de

baisse de consommation en cas de changement des habitudes de consommation. Ce qui est montré par la courbe rouge.

Comparaison des coûts futurs probables entre chauffage infrarouge et chauffage au gaz

La figure 5.1 montrent que l'estimation basse du prix futur du gaz, et l'estimation haute du prix futur de l'électricité se croiseront dans approximativement 14 ans. A ce moment, au plus tard, l'utilisation du chauffage par infrarouge sera plus économique que celle du chauffage au gaz. Comme l'investissement pour s'équiper en chauffage à infrarouge est approximativement la moitié de l'investissement à réaliser pour s'équiper d'un chauffage central au gaz (estimation grossière), l'avantage en terme de prix se produira significativement plus tôt, voire immédiatement. La zone totale de chevauchement, dans laquelle le coût de la consommation de gaz pourrait être supérieur au coût de consommation électrique est hachuré.

Localement, les détaillants proposent des tarifs spéciaux pour l'électricité destinée au chauffage. Ainsi, les coûts d'usage du chauffage à infrarouge sont déjà plus avantageux que les coûts d'usage du chauffage au gaz.

Même si l'évolution des prix des différentes énergies tels que montrés sur la figure 5.1 s'avèrent différents dans le futur, il reste avisé de prendre en considération que les prix des différentes énergies ont toutes les chances d'évoluer d'une manière similaire. (Note du traducteur : les courbes estimatives s'appliquent pour un prix du kWh compris entre 19,5 et 24 cents alors qu'ils se situent en France approximativement à la moitié)

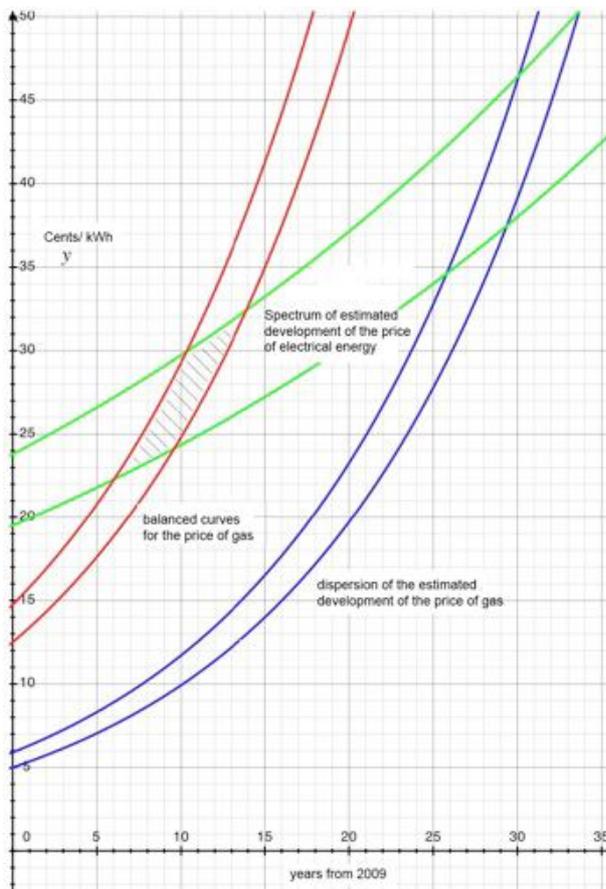


Figure 5.1 : Estimation de l'évolution du prix de l'électricité et du gaz

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

5.3 Interprétation du point de vue renouvelable/écologique

Emissions de CO2

La valeur moyenne d'émission de CO2 pour la production d'électricité était en 2007 de 541g/kWh (Source : DDEW) en Allemagne. Des données plus récentes n'ayant pas encore été publiées, c'est donc cette valeur qui est utilisée. Comme la contribution des énergies renouvelables dans la production d'électricité augmente, ce chiffre est probablement plus bas.

Pour comparer les émissions de CO2, nous avons volontairement pris en compte l'année entière, même si le volume de courant, et par conséquent le montant de CO2 émis par les centrales à charbon est plus haut en hiver, la moitié de l'année, qu'en été. Cependant, il est également vrai que la proportion d'électricité produite à partir d'éoliennes ne fait qu'augmenter. En premier, une orientation, fut elle grossière, doit être trouvée. Afin de prendre en compte les variations saisonnières des émissions de CO2, les variations dans l'espace devrait être prise en compte en même temps que les variations dans le temps. Cependant, ce suivi détaillé pourrait distraire l'attention de la tendance à se diriger le plus vite possible vers des sources d'énergie renouvelables. Des recommandations poussant à l'utilisation de combustibles fossiles pour des réductions à court terme des émissions de CO2 seraient contre productives au regards de cette tendance qui a été fixée pour au moins les 20 prochaines années.

La valeur standard utilisée concernant les chauffage utilisant des chaudières à gaz à condensation de 249g/kWh (IWU 2006) est utilisée dans cette étude comparative, même si la chaudière à basse température équipant actuellement le bâtiment a probablement un niveau d'émission CO2 supérieur. Par ailleurs, une valeur corrigée correspondant à la consommation d'une chaudière gaz à condensation a été utilisée pour la comparaison pour le bâtiment mesuré. Si les émissions sont ramenées à la consommation par unité de surface habitable (kWh/m2), les données se présentent comme suit :

Emissions de CO2 du chauffage à infrarouge (IR-C) ramené au m2
 $541 \text{ g/kWh} * 71,21 \text{ kWh/m}^2 = \mathbf{38,52 \text{ Kg/m}^2}$

Emissions de CO2 du chauffage à gaz avec une chaudière à condensation par M2
 $249 \text{ g/kWh} * 187,85 \text{ kWh/m}^2 = \mathbf{46,77 \text{ kg/m}^2}$

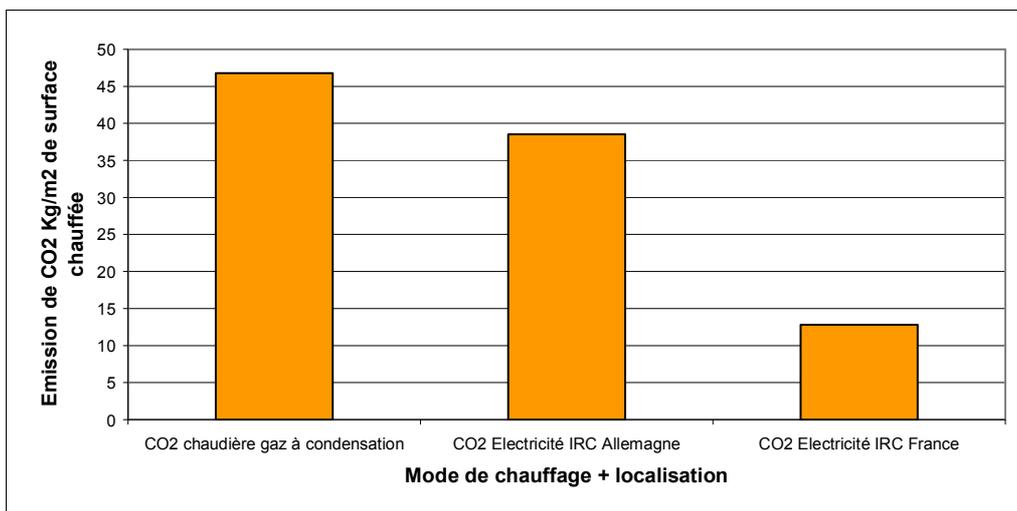


Figure 5.2 Comparaison en terme d'émissions CO2

La différence entre les deux valeurs est suffisamment grande, et ainsi, une constatation générale peut être faite que le chauffage par infrarouge, dès l'instant qu'on considère l'émission de CO₂, obtient de meilleurs résultats que le chauffage au gaz. C'est encore plus vrai si 100% de l'électricité consommée est produite à partir d'énergie renouvelables.

(Note du traducteur : en France, l'ADEME, dans un calcul prenant en compte la saison, considère que le chauffage résidentiel électrique génère 180g CO₂/kWh, le calcul donnerait alors $180 \text{ g/kWh} * 71,21 \text{ kWh/m}^2 = 12,81 \text{ Kg/m}^2$, soit presque **4 fois moins** d'émissions que pour une chaudière à gaz. Il n'y a bien sûr aucune différence entre la France et l'Allemagne lorsqu'il est question du gaz.)

Discussion relative à la qualité de l'énergie

Dans les discussions sur l'usage de l'énergie électrique pour le chauffage, il est souvent fait mention du terme « exergie », qui décrit la proportion maximale utilisable d'une source d'énergie. Plus haute est l'exergie d'une source d'énergie et plus grande est la qualité de cette source d'énergie. L'énergie électrique a ainsi une qualité nettement meilleure que l'énergie thermique. Du fait de cette définition de qualité, une opinion souvent présentée prétend que l'énergie électrique « méfaits » de chauffage

Cette évaluation est totalement incorrecte dès l'instant qu'il est question de renouvelable. Comme il fut défini en détails dans l'introduction sur le sujet « Informations fondamentales sur la gestion énergétique et sa durabilité », le fait que l'énergie électrique soit produite ou non depuis une source d'énergie renouvelable est d'une importance capitale. De cette manière, la qualité écologique d'une source d'énergie est créée. Ce sont les énergies renouvelables, qui sont les plus riches de potentiels, comme le soleil et le vent, qui sont particulièrement faciles à utiliser pour obtenir de l'électricité. L'énergie finale sous la forme d'énergie issue des énergies renouvelables doit ainsi se voir accorder la plus grande priorité.

Le chauffage à infrarouge, fonctionnant à 100% à partir d'électricité résultante d'énergie renouvelables est un des modes de chauffage les plus prometteurs. Comme, dans le même temps, le prix de l'électricité domestique issue du renouvelable a rejoint le prix de l'énergie conventionnelle de chauffage, il n'y a plus de raison économique de préférer l'électricité issue de la combinaison habituelle d'énergie (voir ci-dessus).

5.4 Interprétation du point de vue médical et bien-être.

Même si aucune recherche médicale ou relative au bien être n'a été explicitement entreprise, un certain nombre d'observations subjectives des habitants et des visiteurs ont émergé sur ces sujets. Les observations habituelles sont :

- Pas d'odeurs de poussière résultant du chauffage ; cette propriété a été majoritairement constatée par les personnes souffrant d'asthme ou d'allergie légères ou marquées à la poussière, qui constituaient une proportion importante des visiteurs ;
- Chaud aux pieds (contrairement aux sensations perçues dans le cas du chauffage par convection) ;
- Fraîcheur de l'air
- Sensation de chaleur douillette.

Dans le bâtiment mesuré, il n'y avait pas de problèmes latents de formation de moisissures. Même dans ce cas, on peut dire en général que l'assèchement des murs aide à prévenir la formation de moisissures et des problèmes qui y sont liés.

5.5 Critiques concernant le contenu de certains sites Internet et/ou des arguments publicitaires employés dans les brochures des fabricants

Pendant toute la durée de l'étude, beaucoup de visiteurs ont été interviewés. En dehors de cela, beaucoup de questions ont été posées concernant le projet, à la fois par des spécialistes ou des béotiens qui avaient été informés à travers la page Internet rapportant l'étude. Suivant ces interviews et questions, beaucoup d'interrogations ont émergé concernant les sites Internet et brochures des fabricants de chauffages. Dans les paragraphes suivants, nous aborderons les plus fréquentes erreurs découvertes dans les affirmations publicitaires.

- Mouvement perpétuel et grande efficacité du rayonnement

En appliquant de façon erronée les équations concernant les lois physiques relatives au rayonnement, il est souvent affirmé que les radiateurs à infrarouge émettent une énergie rayonnante supérieure à l'énergie électrique qui les alimentent. Les radiateurs à infrarouge fonctionneraient dans cas comme un mouvement perpétuel, ce qui est en contradiction avec les lois physiques régissant la conservation de l'énergie. Ces affirmations n'ont bien sur aucun sens et ne doivent pas être prise au sérieux.

De même, les affirmations extrêmes concernant le rendement du rayonnement ne sont pas fiables. Les radiateurs à infrarouge long (IR-C) ne peuvent dépasser des valeurs de rendement supérieure à 90% pour des raisons techniques. Les affirmations parlant de rendements à 98 ou 100% concernant la transformation d'énergie électrique en énergie thermique concernant l'addition du rayonnement et de la convection, et non du rayonnement seul. De cette manière, cela crée l'impression que cela concerne le rendement du rayonnement seul.

- Les chauffages à infrarouge qui n'en sont pas

Certains vendeurs de radiateurs électriques classiques, comme de planchers, plafonds et murs chauffants intégrant des plaques chauffantes, commercialisent leurs produits comme étant des chauffages à infrarouge. Ce sont en fait des systèmes à convection qui comportent parfois une proportion de rayonnement supérieure à celle des radiateurs électriques conventionnels. Il est peu probable que les économies d'énergie que nous avons démontrées en utilisant des radiateurs à infrarouge (voir ci-dessus) puissent être obtenues en utilisant ces moyens de chauffage.

C'est la même chose pour les panneaux chauffant électriques indépendants, dont la température de surface n'atteint pas 60°C (en générale de 30 à 50°C), ou de ceux dont la forme provoque une fort mouvement d'air (effet cheminée). Ici aussi, la proportion de convection prévaut. Ces types de chauffages sont souvent décrits avec un vocabulaire fleuri comme des chauffages à infrarouge, même si ce n'est nullement le cas en regard de la définition précise de ce qu'est un radiateur à infrarouge.

6 Conclusions et perspectives futures

La présente étude a été capable de démontrer que le chauffage par infrarouge est une alternative réaliste face aux modes de chauffage plus traditionnels.

Il n'est toujours pas assez pris en considération dans les normes (par exemple concernant l'efficacité du rayonnement des surfaces chauffantes électriques) et les réglementations (par exemple EnEV) ou n'est pas pris suffisamment en considération.

EnEV (agence pour l'énergie Allemande) le présente toujours comme similaire à un chauffage électrique ordinaire, alors même que des économies substantielles peuvent en être espérées au regard de l'efficacité du principe de chauffage par rayonnement par opposition aux radiateurs électriques classiques fonctionnant par contact direct, ce qui chauffe par convection.

Dans les recherches effectuées par les entreprises et mentionnées précédemment, des différences de consommation allant jusqu'à 50% sont souvent constatées lorsque le chauffage infrarouge est comparé aux planchers chauffants, ou chauffage par accumulation de nuit. Ces affirmations des entreprises sont prouvées indirectement par ce projet, et les études comparatives menées par des entreprises entre le chauffage infrarouge et le chauffage au gaz se trouvent tout à fait confirmées directement par la présente étude.

Le remplacement des chauffages à accumulation de nuit ou des planchers chauffants s'opère avec une extrême facilité (le câblage est dans la plupart des cas déjà en place et ne nécessite que des modifications mineures), il suffit de mettre les radiateurs à infrarouge en place, et pour au prix d'investissements légers (la moitié ou moins du prix de mise en œuvre d'un chauffage central au gaz), une mesure facile à prendre pour augmenter l'efficacité du chauffage.

Les autres avantages en faveur du chauffage à infrarouge sont :

- Des faibles investissements
- Pas de dépenses connexes (ramonage)
- Pas de maintenance
- Possibilité d'opérer à 100% à partir d'électricité issue du renouvelable

Et même si aucune étude concernant les produits eux-mêmes n'ont été menées, les propriétés générales des radiateurs infrarouge long (IR-C) dans les immeubles résidentiels peuvent être résumées à partir des résultats de cette étude :

- Température de surface comprise entre 60 °C et 120°C
- Pas d'accumulation
- Des surfaces aussi simples que possible pour minimiser la proportion de convection

À l'occasion de recherches ultérieures, l'échantillonnage des mesures relevées devra comporter une base plus large. En particulier le critère de sélection et de dimensionnement des radiateurs à infrarouge devra être établi pour la rénovation d'immeubles anciens comme pour des immeubles nouvellement construits. Le remplacement des chauffages à accumulation nocturne est particulièrement intéressant dans ces cas-là.

En dehors de cela, il est possible de développer des alternatives réalistes pour la production d'eau chaude sanitaire qui utiliseront les énergies renouvelables et seront aussi efficaces que possibles comparées aux méthodes habituelles.

7 Références et bibliographie

Dans le paragraphe suivant, seuls les ouvrages de base sont listés. Pour une orientation plus facile, les liens vers les ouvrages utilisés sont fournis directement dans le rapport, avec les chapitres concernés (*entre parenthèses*)

Kübler, Thomas: Infrarot-Heizungstechnik für Großräume, Vulkan Verlag 2001

Herwig, Heinz: Wärmeübertragung A - Z: Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte, Springer, Berlin; 1. Auflage, 2000

Polifke, Wolfgang; Kopitz, Jan: Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden, mit SoftwarePaket Scilab auf CD-ROM; Pearson Studium 2005

Herr, Horst: Wärmelehre. Technische Physik 3; Europa-Lehrmittel; 4. A., 2006

Konstantin, Panos: Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt; Springer, Berlin; 2. Aufl. 2009

Petermann, Jürgen (Herausgeber): Sichere Energie im 21. Jahrhundert; Hoffmann und Campe, 2008

Appendices

Annexe A: Tableaux

Tableau 1: Mesures quotidienne de consommation d'énergie par groupes de pièces chauffées à l'infrarouge.

Date	Groupe 1 (kWh)	Groupe 2 (kWh)	Groupe 3 (kWh)	Groupe 4 kWh)	Total
16/11/08	3,227	2,953	26,739	14,517	47,436
17/11/08	3,315	3,153	24,995	13,064	44,527
18/11/08	5,572	2,953	27,581	17,812	53,918
19/11/08	3,824	3,623	28,052	14,595	50,094
20/11/08	2,687	2,937	29,465	15,728	50,817
21/11/08	2,233	2,834	28,239	16,828	50,134
22/11/08	3,369	3,194	24,664	18,079	49,306
23/11/08	3,543	3,375	25,364	17,131	49,413
24/11/08	2,957	3,520	24,997	17,697	49,171
25/11/08	3,842	3,261	26,415	14,635	48,153
26/11/08	3,750	3,465	26,348	14,369	47,932
27/11/08	3,885	3,544	26,546	13,572	47,547
28/11/08	3,975	3,648	26,901	14,598	49,122
29/11/08	4,199	3,757	26,448	13,738	48,142
30/11/08	3,967	5,202	25,856	8,896	43,921
01/12/08	4,636	2,990	26,293	14,686	48,605
02/12/08	3,949	3,502	25,245	16,293	48,989
03/12/08	3,719	3,465	28,555	14,503	50,242
04/12/08	3,907	3,204	23,987	11,793	42,891
05/12/08	3,354	3,120	25,323	10,242	42,039
06/12/08	2,664	3,199	18,922	12,618	37,403
07/12/08	2,775	2,996	22,896	12,983	41,650
08/12/08	3,419	3,238	25,765	14,439	46,861
09/12/08	3,976	3,476	26,298	14,675	48,425
10/12/08	3,968	3,681	25,748	14,480	47,877
11/12/08	4,103	3,558	26,260	14,363	48,284
12/12/08	4,336	3,479	26,707	14,727	49,249
13/12/08	4,609	3,723	27,223	15,136	50,691
14/12/08	5,218	4,193	28,501	14,713	52,625
15/12/08	5,015	3,759	26,927	15,165	50,866
16/12/08	3,941	3,791	26,914	15,092	49,738
17/12/08	4,740	3,709	27,309	14,795	50,553
18/12/08	4,463	3,761	26,870	14,788	49,882
19/12/08	4,031	3,630	26,618	14,694	48,973
20/12/08	3,855	3,615	25,165	13,680	46,315
21/12/08	2,291	3,251	23,854	10,399	39,795
22/12/08	2,340	2,707	23,950	8,533	37,530
23/12/08	2,110	2,628	24,445	9,465	38,648
24/12/08	2,611	3,134	25,748	13,507	45,000
25/12/08	3,716	3,238	25,415	14,370	46,739
26/12/08	3,886	3,260	26,679	14,820	48,645
27/12/08	5,044	4,560	27,586	15,593	52,783
28/12/08	4,760	4,351	27,773	16,391	53,275
29/12/08	5,722	4,748	28,633	16,421	55,524
30/12/08	5,643	4,837	28,976	17,438	56,894
31/12/08	5,892	3,835	27,954	19,099	56,780

01/01/09	5,173	2,612	26,402	18,545	52,732
02/01/09	5,724	2,852	27,263	17,806	53,645
03/01/09	5,071	3,769	31,755	21,423	62,018
04/01/09	6,304	4,233	30,499	22,104	63,140
05/01/09	5,882	4,016	29,528	19,537	58,963
06/01/09	5,936	4,036	30,918	22,210	63,100
07/01/09	7,344	3,770	30,765	24,626	66,505
08/01/09	7,023	3,933	31,659	30,812	73,427
09/01/09	7,655	3,643	33,737	32,188	77,223
10/01/09	7,362	3,268	33,983	29,199	73,812
11/01/09	8,136	3,359	32,511	32,990	76,996
12/01/09	7,562	3,453	32,379	33,142	76,536
13/01/09	6,148	3,519	32,154	31,586	73,407
14/01/09	5,450	3,689	28,003	26,967	64,109
15/01/09	5,571	3,749	28,112	32,583	70,015
16/01/09	5,744	2,933	27,107	18,532	54,316
17/01/09	5,622	4,112	28,329	17,541	55,604
18/01/09	3,299	3,240	24,440	16,852	47,831
19/01/09	3,645	4,419	23,062	20,770	51,896
20/01/09	3,310	4,070	24,458	20,234	52,072
21/01/09	3,973	3,911	18,963	17,031	43,878
22/01/09	4,432	3,952	27,609	23,820	59,813
23/01/09	3,813	3,871	23,546	14,870	46,100
24/01/09	3,567	4,413	23,461	9,166	40,607
25/01/09	1,823	5,856	24,489	13,040	45,208
26/01/09	4,529	3,765	28,138	2,297	38,729
27/01/09	5,185	3,818	30,266	14,056	53,325
28/01/09	5,014	3,667	28,195	11,254	48,130
29/01/09	4,645	3,589	28,635	12,546	49,415
30/01/09	5,084	3,570	29,308	13,144	51,106
31/01/09	5,553	3,966	31,194	19,531	60,244
01/02/09	4,930	4,721	28,633	27,281	65,565
02/02/09	4,607	4,404	28,691	26,619	64,321
03/02/09	1,224	6,303	26,122	18,594	52,243
04/02/09	4,791	4,255	21,824	25,427	56,297
05/02/09	3,430	3,448	21,013	19,808	47,699
06/02/09	3,782	4,522	29,739	21,493	59,536
07/02/09	3,396	3,472	21,479	20,036	48,383
08/02/09	3,848	4,458	29,194	21,354	58,854
09/02/09	4,229	3,699	28,536	23,153	59,617
10/02/09	4,278	3,577	26,842	19,947	54,644
11/02/09	4,009	3,947	24,553	16,496	49,005
12/02/09	3,907	4,251	29,557	22,971	60,686
13/02/09	4,722	3,996	27,953	24,881	61,552
14/02/09	4,391	3,350	25,838	19,825	53,404
15/02/09	4,889	4,982	27,507	26,652	64,030
16/02/09	4,781	4,084	28,306	24,415	61,586
17/02/09	4,168	4,286	27,003	22,272	57,729
18/02/09	4,393	3,702	27,832	22,926	58,853
19/02/09	5,065	4,584	29,100	24,810	63,559
20/02/09	4,766	3,951	28,746	23,244	60,707
21/02/09	3,782	4,584	29,031	21,172	58,569
22/02/09	3,871	4,496	24,213	15,884	48,464

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

23/02/09	3,591	3,715	27,230	20,091	54,627
24/02/09	3,356	4,281	25,220	19,151	52,008
25/02/09	3,716	4,087	25,905	18,361	52,069
26/02/09	3,738	3,962	24,267	19,888	51,855
27/02/09	3,540	3,998	19,185	19,160	45,883
28/02/09	2,894	3,995	17,952	16,868	41,709
01/03/09	3,090	4,096	17,229	16,700	41,115
02/03/09	2,050	3,907	16,260	15,014	37,231
03/03/09	2,358	4,185	17,847	17,972	42,362
04/03/09	2,957	4,263	18,720	16,841	42,781
05/03/09	2,867	4,062	19,257	18,774	44,960
06/03/09	3,258	3,831	18,943	21,765	47,797
07/03/09	3,570	4,930	17,441	17,737	43,678
08/03/09	3,279	3,974	18,832	19,031	45,116
09/03/09	2,951	3,815	18,573	18,240	43,579
10/03/09	3,435	4,154	17,554	19,585	44,728
11/03/09	2,991	3,325	19,751	17,929	43,996
12/03/09	3,456	3,855	18,147	20,075	45,533
13/03/09	2,984	3,895	17,417	16,260	40,556
14/03/09	2,166	3,924	17,529	13,583	37,202
15/03/09	1,842	3,576	13,657	15,652	34,727
16/03/09	1,943	3,602	14,878	15,071	35,494
17/03/09	2,238	3,700	15,465	13,715	35,118
18/03/09	2,178	5,250	16,167	13,959	37,554
19/03/09	2,880	4,819	19,433	14,531	41,663
20/03/09	2,134	4,991	21,673	15,157	43,955
21/03/09	3,574	5,387	25,056	14,318	48,335
22/03/09	3,920	5,482	20,987	21,867	52,256
23/03/09	2,814	4,418	19,357	18,095	44,684
24/03/09	3,166	3,606	20,257	19,235	46,264
25/03/09	3,539	4,714	21,300	22,963	52,516
26/03/09	3,823	4,104	18,433	21,561	47,921
27/03/09	3,481	3,862	21,665	18,040	47,048
28/03/09	2,709	4,405	19,428	16,872	43,414
29/03/09	2,571	3,750	13,665	17,649	37,635
30/03/09	2,103	4,942	14,862	14,692	36,599
31/03/09	0,846	1,601	8,069	8,177	18,693
01/04/09	0,649	1,935	5,934	7,328	15,846
02/04/09	0,491	1,284	3,871	5,274	10,920
03/04/09	0,538	1,474	4,277	0,117	6,406
04/04/09	0,416	1,327	3,475	0,225	5,443
05/04/09	0,387	1,225	2,884	0,093	4,589
06/04/09	0,279	1,359	2,993	0,051	4,682
07/04/09	0,361	1,184	3,714	0,025	5,284
08/04/09	0,355	1,411	3,922	0,018	5,706
09/04/09	0,478	1,672	3,543	0,015	5,708
10/04/09	0,642	1,992	3,454	0,016	6,104
11/04/09	0,222	1,482	3,369	0,012	5,085
12/04/09	0,797	1,773	3,233	0,018	5,821
13/04/09	0,827	1,338	2,980	0,015	5,160
14/04/09	0,616	1,944	3,009	0,018	5,587
15/04/09	0,472	1,829	2,352	0,018	4,671
16/04/09	0,416	1,369	7,621	6,589	15,995

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

17/04/09	1,000	2,073	15,782	11,536	30,391
18/04/09	1,449	3,116	16,361	12,410	33,336
19/04/09	0,552	1,982	13,189	4,954	20,677
20/04/09	0,248	1,657	8,172	2,887	12,964
21/04/09	0,024	1,135	9,271	2,478	12,908
22/04/09	0,030	1,086	8,201	4,318	13,635
23/04/09	1,123	2,564	10,630	8,778	23,095
24/04/09	1,803	2,706	12,957	7,309	24,775
25/04/09	1,507	2,158	15,070	7,377	26,112
26/04/09	0,530	1,066	10,792	5,457	17,845
27/04/09	0,220	1,125	6,825	6,334	14,504
28/04/09	1,135	1,972	12,020	9,188	24,315
29/04/09	1,537	2,501	11,367	9,939	25,344
30/04/09	0,864	2,313	14,122	10,055	27,354

Tableau 2: Mesures hebdomadaires du volume de gaz consommé.

Date	Semaine	M3	kWh
23/11/08	47	135	1408,05
30/11/08	48	174	1814,82
07/12/08	49	158	1647,94
14/12/08	50	171	1783,53
21/12/08	51	164	1710,52
28/12/08	52	152	1585,36
04/01/09	1	205	2138,15
11/01/09	2	228	2378,04
18/01/09	3	204	2127,72
25/01/09	4	168	1752,24
01/02/09	5	188	1960,84
08/02/09	6	169	1762,67
15/02/09	7	170	1773,1
22/02/09	8	168	1752,24
01/03/09	9	139	1449,77
08/03/09	10	130	1355,9
15/03/09	11	122	1272,46
22/03/09	12	123	1282,89
29/03/09	13	92	959,56
05/04/09	14	103	1074,29
12/04/09	15	30	312,9
19/04/09	16	58	604,94
26/04/09	17	47	490,21

Tableau 3: Cumuls hebdomadaires de consommation d'énergie par groupes de pièces chauffées à l'infrarouge.

Semaine	Cuisine		Bureau		Total
	Salle de bain	Salle à manger	Chambres	Salon	
47	27,95	25,02	215,10	127,75	442,82
48	26,58	26,40	183,51	97,51	382,00
49	25,00	22,48	171,22	93,12	360,82
50	29,63	25,35	186,50	102,56	394,04
51	28,34	25,52	183,66	98,61	387,13
52	24,47	23,88	181,60	92,68	374,63
1	39,53	23,88	201,48	132,84	398,73
2	49,34	26,03	223,10	191,56	492,03
3	39,40	24,70	200,52	177,20	444,82
4	24,56	30,49	165,59	118,93	343,57
5	34,94	27,10	204,37	100,11	371,52
6	25,08	30,86	178,06	153,33	393,33
7	30,43	27,80	190,79	153,93	409,95
8	30,83	29,69	194,23	154,72	417,47
9	23,93	28,13	156,99	130,22	348,27
10	20,34	29,15	127,30	127,13	313,92
11	19,83	29,15	122,63	121,32	303,93
12	19,05	33,23	133,66	108,62	306,56
13	22,10	28,86	134,11	134,42	332,49
14	5,43	13,79	43,37	35,91	112,50
15	3,13	10,87	24,23	0,16	53,39
16	5,33	13,65	61,29	35,54	131,81
17	5,27	12,37	75,09	38,60	148,33

© Copyright Dr.-ing. Peter Kosack

Traduit en français depuis l'anglais par G. PASDELOUP – Energetic Plus (contact@energeticplus.fr)

Annexe B: Images



Chambres



Living



Salle de bain



Cuisine



Salle de séjour



Bureau