

*Cycle d'études postgrades en énergie*  
*Laboratoire de systèmes énergétiques*

**Projet de maîtrise**

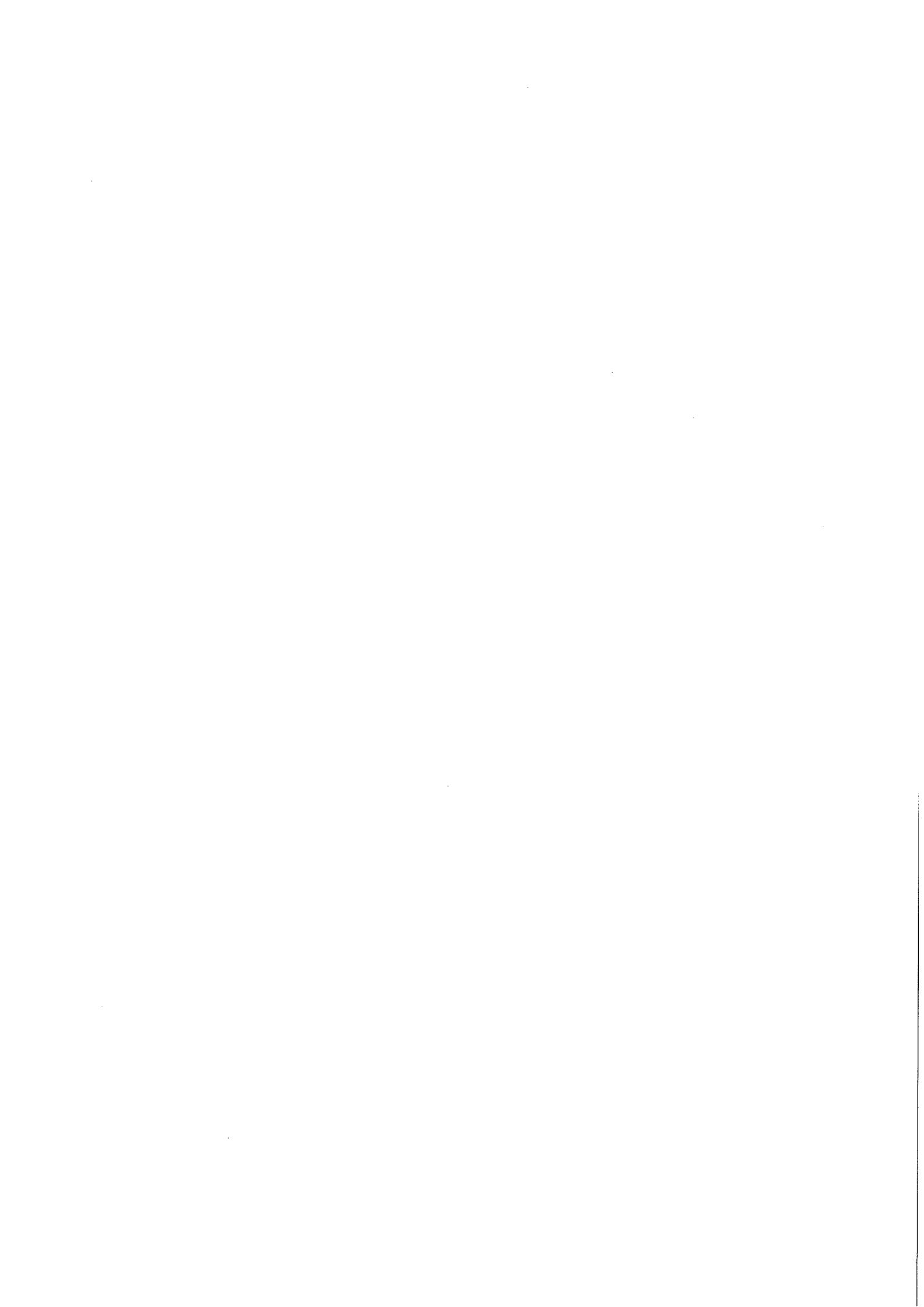
**ETUDE, APPLICATION ET EVALUATION  
DE LA NOUVELLE NORME  
EUROPEENNE (EN)  
SUR UN BATIMENT INDUSTRIEL**

**par**

**Daniel PAHUD**

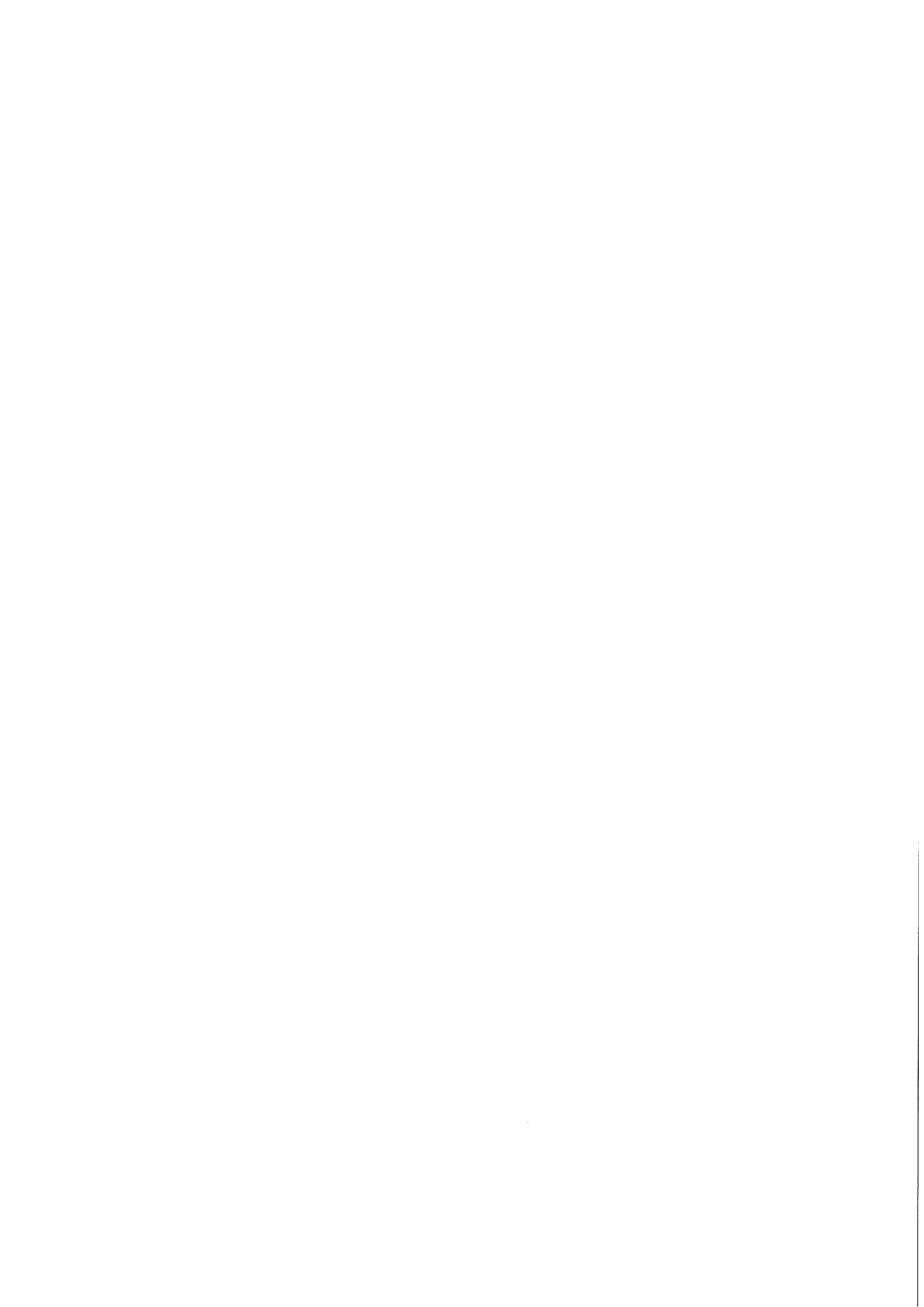
**Enseignant responsable: C.A. ROULET**  
**Expert : B. LACHAL**

**Avril 1992**



## Table des matières

<b>1: <u>Introduction.</u></b>	p1
<b>2: <u>Norme européenne (EN).</u></b>	p1
<b>3: <u>Objectifs.</u></b>	p2
<b>3: <u>Situation du bâtiment.</u></b>	p2
<b>4: <u>Application de la norme EN, hypothèses.</u></b>	p3
<b>5: <u>Pertes spécifiques par transmission <math>H_t</math> (W/K).</u></b>	p4
<b>7: <u>Pertes par le sol.</u></b>	p6
7.1: <u>le stock souterrain.</u>	p6
7.2: <u>le parking souterrain.</u>	p7
<b>8: <u>Pertes spécifiques par ventilation <math>H_v</math> (W/K).</u></b>	p7
<b>9: <u>Pertes spécifiques à travers la double peau <math>H_{ie}</math> (W/K).</u></b>	p8
9.1: <u>Pertes spécifiques par conduction uniquement.</u>	p8
9.2: <u>Sensibilité des pertes spécifiques à la ventilation de la double peau.</u>	p10
9.3: <u>Pertes spécifiques totales de la double peau.</u>	p12
<b>10: <u>Gains solaires, surfaces équivalentes de captation.</u></b>	p13
10.1: <u>Vitrages ordinaires.</u>	p13
10.2: <u>Double peau.</u>	p14
10.2.1: <u>Gains solaires indirects.</u>	p15
10.2.2: <u>Gains solaires directs.</u>	p16
<b>11: <u>Température du bâtiment.</u></b>	p18
<b>12: <u>Détermination expérimentale des pertes de chaleur spécifiques <math>H_k</math> [W/K] et d'une surface effective <math>S_{eff}</math> [m<sup>2</sup>].</u></b>	p20
<b>13: <u>Calculs avec la norme.</u></b>	p23
13.1: <u>Constante de temps du bâtiment.</u>	p24
13.2: <u>Facteur d'utilisation.</u>	p24
13.3: <u>Calculs mensuels.</u>	p25
<b>14: <u>Sensibilité aux ouvertures de la double peau.</u></b>	p27
<b>15: <u>Sensibilité à différentes paramètres.</u></b>	p29
<b>16: <u>Recommandations SIA.</u></b>	p29
<b>17: <u>Conclusion.</u></b>	p31
<b>18: <u>Annexe 1: le bâtiment.</u></b>	p32
<b>19: <u>Références.</u></b>	p35



## **1: Introduction.**

La norme européenne, intitulée " Residential Buildings - Energy Requirements for Heating - Calculation Method" est un projet en cours qui veut mettre à disposition un standard accepté et valable dans toute l'Europe. Ce standard procure une méthode de calcul simplifiée qui permet d'évaluer les besoins énergétiques d'un bâtiment pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Cette méthode de calcul s'applique avant tout à des bâtiments résidentiels qui ne possèdent pas d'installation d'air conditionné et dont les gains internes sont relativement faibles.

## **2: Norme européenne (EN).**

La méthode de calcul permet de découper l'espace chauffé en différentes zones, caractérisées par des températures intérieures différentes, et d'effectuer les bilans énergétiques pour chacune des zones en régime stationnaire. Les effets dynamiques occasionnés par les gains internes et solaires sont pris en compte dans un facteur d'utilisation. Les besoins énergétiques du bâtiment sont la somme des besoins de chacune des zones. La méthode est basée sur une période de calcul mensuelle; mais elle peut également être appliquée à la saison, si la durée de la saison de chauffage est connue. La procédure de calcul est découpée en 10 étapes qui sont ré-énumérées ci-dessous:

1) Le bâtiment est divisé en zones chauffées et en espaces non chauffés. Les liens thermiques entre les zones, entre les zones et les espaces, entre tous ces volumes et l'environnement extérieur sont définis.

2) Calcul des pertes thermiques entre chaque zone et l'environnement extérieur, y compris le sol, sur l'hypothèse de températures intérieures constantes. Ces pertes comprennent les transferts de chaleur par transmission et ventilation.

3) Les transferts de chaleur (transmission et ventilation) entre chaque paire de zones sont calculés.

4) Les gains internes et solaires de chaque zone sont calculés.

5) Un facteur d'utilisation  $\eta$  des gains est déterminé sur la base du rapport gains sur pertes et de l'inertie thermique de la zone.

6) Calcul des besoins de chaleur nets pour chaque zone et chaque mois par la différence entre les pertes et les gains nets.

7) La saison de chauffage est définie et les besoins de chauffage annuels sont obtenus soit directement soit en sommant les besoins mois par mois. Les besoins globaux du bâtiment sont la somme des besoins de chaque zone.

8) Correction de ces résultats, en prenant compte des effets du chauffage par intermittance et de régulation, basée sur un ensemble conventionnel de températures prescrites.

9) Calcul des besoins de chaleur pour l'eau chaude sanitaire.

10) Calcul de la demande d'énergie brute du bâtiment en prenant compte des caractéristiques du système de chauffage.

### **3: Objectifs.**

La norme est appliquée à un immeuble industriel existant. Cet immeuble est doté de façades de type "double peau", à fort gains solaires; l'intérêt de l'étude, en plus du bilan énergétique du bâtiment, tient essentiellement sur la compréhension de la "double peau" et à la capacité de la norme à évaluer les gains solaires résultants. Les calculs sont effectués pour la saison de chauffage 90-91 et 91-92 jusqu'en mars. Les points 8,9,10 de la procédure de calcul ne sont pas traités. Les effets du chauffage par intermittances sont contournés en prenant pour température intérieure une température mesurée, et non une température prescrite. Les besoins d'eau chaude sanitaire ne se posent même pas puisque le réseau de distribution n'est pas encore installé. Enfin, les besoins de chauffage sont directement comparés à la chaleur distribuée dans le bâtiment, à la sortie de la chaufferie.

Finalement, l'application des recommandations SIA 180/1 et 380/1 permet de voir si le bâtiment répond à ces normes.

### **3: Situation du bâtiment.**

L'immeuble, le Centre Industriel et Artisanal Marcinhès, est situé dans la zone industrielle de Meyrin-Satigny, près de Genève, en Suisse. Sa situation géographique est caractérisée par une latitude de 46°12'N, une longitude de 6°9'E (méridien de Greenwich) et une altitude de 430 m.

La description du bâtiment fait l'objet de l'annexe 1.

#### **4: Application de la norme EN, hypothèses.**

L'application de la norme EN passe par la définition de l'espace chauffé au travers des différentes zones ainsi que des espaces non-chauffés.

En raison des locaux loués et des locaux vides, des différences de température de plus de 4 K sont observés à l'intérieur du bâtiment. Mais la complexité engendrée par le découpage du bâtiment en zones rendrait le travail beaucoup trop laborieux. Une procédure permise et simplificatrice consiste à traiter le bâtiment en une zone unique, dont la température intérieure est la moyenne pondérée des températures de toutes les zones.

Cette zone est formée des six niveaux de l'immeuble, du rez-inférieur à l'attique, en excluant toutefois la double peau. Celle-ci est traitée comme un espace non chauffé à forts gains solaires, ou, en d'autres termes, comme une serre. C'est probablement l'hypothèse la plus contraignante du travail. Il reste alors le parking souterrain, pris comme un espace non chauffé à température fixe. Toutes les surfaces sont mesurées avec les dimensions extérieures.

## 5: Pertes spécifiques par transmission Ht (W/K).

Ces pertes concernent toutes les surfaces occupées par les fenêtres, les murs en béton nu, les cloisons en bois provisoires, les portes vitrées des quais de débarquement du rez-supérieur ainsi que le toit.

Le rez-inférieur est l'étage qui possède la plus grande surface de mur en béton nu. Sur toute la longueur de la façade sud-est et une fraction de la nord-est, une structure en béton permet le passage de véhicules au niveau du rez-supérieur, ce qui occasionne, au niveau du rez-inférieur, une extension de son volume sur une profondeur de 10 m. Il en résulte une surface de béton supplémentaire, de plus de 1'000 m<sup>2</sup>, qui crée des pertes disproportionnées (plus de 3 kW/K). Comme cette extension n'est pas réglée en température, les pertes sont diminuées par une baisse de température. Une manière grossière d'évaluer cet effet est de supposer l'extension inexistante et de la remplacer par un mur en béton dans le prolongement de la façade.

Les coefficients de transmission de chaleur K [W/m<sup>2</sup> K] sont déterminés avec les coefficients d'échange thermique superficiel  $\alpha$  [2] et les conductibilités thermiques  $\lambda$  [3] du tableau 1 (les références indiquent les sources de ces valeurs):

		Epaisseur [m]
$\alpha_i$ (face intérieure)	8 W/m <sup>2</sup> K	-
$\alpha_e$ (face extérieure)	20 W/m <sup>2</sup> K	-
$\lambda$ bois	0.15 W/mK	0.05
$\lambda$ isolation	0.05 W/mK	0.10
$\lambda$ béton	1.8 W/mK	0.15 - 0.50
Kdbl vitr. isol.	2.9 W/m <sup>2</sup> K	-
K cadre fenêtre	2.9 W/m <sup>2</sup> K	-

Tableau 1: Valeurs des coefficients d'échanges thermiques superficiels  $\alpha$ , des conductibilités thermiques  $\lambda$  et des transmittances thermiques des fenêtres et des cadres K.

Les doubles vitrages isolants sont équipés de cadre en aluminium à ponts coupés; la transmission thermique des cadres est prise égale à celle des vitrages. Les portes vitrées, visiblement de même conception, sont assimilées aux fenêtres.



Le toit de l'attique est isolé avec 10cm d'isolation; la courserie du 3<sup>e</sup> étage, en toiture plate, est constituée d'une dalle en béton (35 cm d'épaisseur), d'une étanchéité (1cm d'épaisseur) recouverte de dalles en ciment posées sur des cales en plastique, laissant une lame d'air de 1 cm. Le tableau 2 détaille les différentes pertes façade par façade.

	Matériau	Surface [m <sup>2</sup> ]	K moyen [W/Km <sup>2</sup> ]	Ht [W/K]
Faç. N-E :	bois	37	2.0	73
	béton	145	3.0	436
	mur isolé	71	0.5	33
	fenêtre	205	2.9	593
Faç. N-W :	bois	21	2.0	42
	béton	213	2.5	532
	mur isolé	112	0.5	52
	fenêtre	198	2.9	573
	porte vitrée	147	2.9	425
Faç. S-W :	bois	37	2.0	72
	béton	25	3.1	78
	mur isolé	71	0.5	33
	fenêtre	155	2.9	450
	porte vitrée	37	2.9	107
Faç. S-E :	bois	16	2.0	31
	béton	313	2.9	908
	mur isolé	112	0.5	52
	fenêtre	170	2.9	492
	porte vitrée	192	2.9	556
Toit :	attique	2697	0.5	1240
	3e étage	442	1.8	791
	Total	5414	1.4	7600

Tableau 2: Surface, coefficient de transmission de chaleur moyen et pertes spécifiques par transmission de chaque élément de l'enveloppe.

Le coefficient K des murs en béton est une valeur moyenne résultant des différentes épaisseurs et surfaces de ces murs. La valeur moyenne de la façade nord-ouest, 2.5 W/m<sup>2</sup>K, est basse en raison de 170 m<sup>2</sup> de murs protégés par des locaux annexes. Ceux-ci étant ouverts en permanence, on peut supposer leur température proche de la température extérieure et calculer le coefficient de transmission de chaleur K du mur avec un  $\alpha_e$  égal à 8 W/m<sup>2</sup>K au lieu de 20 W/m<sup>2</sup>K.

Parmi les 700 m<sup>2</sup> de mur en béton répertoriés, 70 m<sup>2</sup> (10%) sont en contact avec une dalle intérieure, donnant probablement lieu à un pont thermique. L'importance relative étant toutefois modeste, ces 70 m<sup>2</sup> sont assimilés aux contrecœurs (0.15 m épaisseur).

## 7: Pertes par le sol.

Il s'agit à nouveau d'une évaluation grossière; environ une moitié du rez-inférieur (1'500 m<sup>2</sup> ) est en contact avec le stockage souterrain de chaleur, créant des gains de chaleur, et l'autre moitié (1'500 m<sup>2</sup> ) avec le parking souterrain, créant des pertes. Il reste encore une fraction de surface (100-200 m<sup>2</sup> ), occupée par l'abri PC et la chaufferie, qui est ignorée.

### 7.1: le stock souterrain.

Une évaluation rapide mais approximative consiste à estimer la puissance mensuelle dégagée par le toit du stockage, en évaluant le flux de chaleur résultant d'un profil de température mesuré et représentatif de l'ensemble du stockage.

Des profils verticaux de température sont mesurés hebdomadairement en différents endroits du stockage.

Le tableau 3 indique les puissances fournies par le stockage, mois par mois, durant la saison de chauffage, évaluées sur le haut d'un profil représentatif du mois et mesuré à mi-chemin entre le centre et le bord du stockage.

	Flux thermique W/m <sup>2</sup>	Puissance kW
Oct. 90	8.2	12
Nov. 90	9.7	14
Déc. 90	9.7	14
Jan. 91	6.6	10
Fév. 91	3.0	4.5
Mars 91	1.6	2.4
Avr. 91	2.0	3
Mai 91	3.9	6
Oct. 91	7.4	11
Nov. 91	8.9	13
Déc. 91	10.2	15
Jan. 92	5.7	9
Fév. 92	2.3	3
Mars 92	1.0	1.5

Tableau 3: Gains mensuels dans le rez-inférieur occasionnés par les pertes du toit du stockage saisonnier.

## 7.2: le parking souterrain.

Le parking souterrain est considéré comme un espace à température fixe. Une température de 11 °C lui est attribuée, correspondant à la température moyenne du terrain non perturbé. Avec 1'500 m<sup>2</sup> et 2 W/m<sup>2</sup>K, les pertes par le parking se montent à 3kW/K. En anticipant sur la suite, l'écart de température entre le parking et le rez-inférieur est environ deux fois plus petit que l'écart pris avec la température du bâtiment, ramenant les pertes spécifiques à 1.5 kW/K.

Il va de soi que ces évaluations relèvent de l'arbitraire. Elles donnent cependant un ordre de grandeur qui permet de fixer l'importance de ces effets. Le cumul de ces pertes et gains par le sol durant le saison de chauffage 90-91 montre une perte nette qui ne s'élève pas à plus de quelques pourcents de la demande de chauffage du bâtiment.

## **8: Pertes spécifiques par ventilation Hv (W/K).**

Ce sont probablement les pertes les moins connues. Les grandes hauteurs des étages (entre 3.6 et 4.1 m) rendent le volume intérieur très grand relativement à la surface. Les taux de renouvellement d'air admis pour les habitations, entre 0.5 et 1h<sup>-1</sup>, créeraient des débits d'air très importants de l'ordre de 50'000 m<sup>3</sup>/h.

A l'exception d'un monte charge et de quelques locaux ventilés, le bâtiment n'est pas équipé de système de ventilation. Les étages les plus ventilés sont probablement le rez-inférieur et supérieur en raison de portes d'entrées souvent ouvertes et de cloisons peu perméables.

Beaucoup de facteurs influencent le taux de renouvellement d'air: la différence de pression créée par le chauffage du bâtiment, les aérations spontanées au travers des portes et fenêtres, les infiltrations d'air causées par le vent, etc. .... Cependant, le taux de renouvellement d'air moyen doit être très faible pour deux raisons:

-l'étanchéité des fenêtres est bien soignée et le rapport surface sur volume du bâtiment est relativement faible,

-le bâtiment n'est pas aéré artificiellement en dehors des heures de travail (porte ou fenêtre ouverte et/ou ventilation enclenchée).

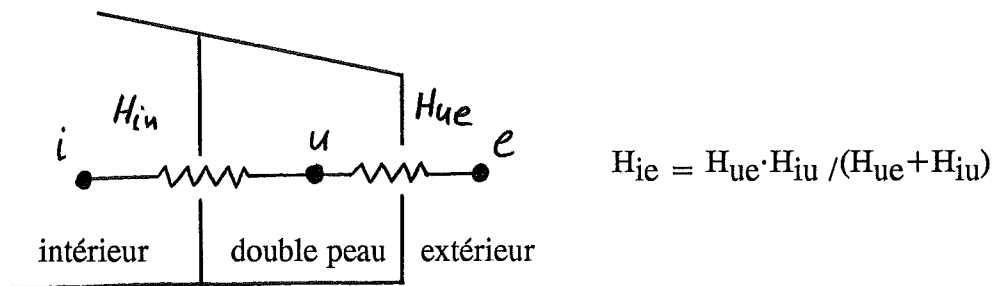
Un taux de renouvellement d'air de 0.2 h<sup>-1</sup> est retenu, donnant les pertes spécifiques par ventilation du tableau 4.

Capacité calorifique spécifique de l'air [kJ/m <sup>3</sup> K]	Taux de renouvellement d'air [h <sup>-1</sup> ]	Volume intérieur [m <sup>3</sup> ]	Pertes spécifiques par ventilation H <sub>v</sub> [W/K]
1,15	0,2	68'330	4'400

Tableau 4: Pertes spécifiques par ventilation, H<sub>v</sub>.

**9: Pertes spécifiques à travers la double peau H<sub>ie</sub> (W/K).**

La double peau est traitée comme une serre non chauffée. Pour évaluer les pertes de la zone chauffée à l'extérieur, il faut considérer la figure 1:



H<sub>iu</sub> [W/K]: perte spécifique de l'intérieur dans la double peau.

H<sub>ue</sub> [W/K]: perte spécifique de la double peau à l'extérieur (transmission et ventilation).

H<sub>ie</sub> [W/K]: perte spécifique de l'intérieur à l'extérieur à travers la double peau.

Figure 1: Pertes spécifiques relatives à la double peau. Modèle de la serre.

Ces pertes spécifiques contiennent les pertes par transmission et les pertes par ventilation. Comme la peau intérieure est fermée en permanence, les pertes par ventilation au travers de celle-ci sont négligées et H<sub>iu</sub> ne contient que les pertes par transmission.

Dans un premier temps, les pertes sont évaluées en ignorant la ventilation de la double peau.

**9.1: Pertes spécifiques par conduction uniquement.**

Trois types de double peau sont distingués:

- 1) Double peau ouverte: double peau ventilée (ouverture en haut et en bas de la façade).
- 2) Double peau fermée: contrecœur (peau intérieure), simple vitrage teinté à l'intérieur (peau extérieure), pas d'ouverture pour ventilation.
- 3) Double peau attique: double peau pas ventilée (pas d'ouvertures prévues).

Le coefficient de transmission de chaleur K de la peau intérieure est obtenu en faisant la moyenne de chaque élément pondéré par sa surface:

$$K = \frac{\sum_i K_i S_i}{\sum_i S_i}$$

Cette méthode sous-estime légèrement la valeur de K. Le calcul de la borne supérieure donne une différence de 5%.

Le tableau 5 donne les valeurs des coefficients de transmission de chaleur des différents éléments composant la double peau.

	$\alpha_i$ [W/m <sup>2</sup> K]	Epaisseur [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\alpha_e$ [W/m <sup>2</sup> K]	K [W/m <sup>2</sup> K]
<u>Peau intérieure</u>					
Double vitrages					2.5
Contrecœur	8	0.11	1.8	8	3.2
Pilier	8	0.25	1.8	8	2.6
<u>Peau extérieure</u>					
Double vitrage					2.9
Simple vitrage					5.6

$\alpha_i$ : coefficient d'échange thermique, face intérieure.

$\alpha_e$ : coefficient d'échange thermique, face extérieure.

$\lambda$ : conductibilité thermique.

K: coefficient de transmission de chaleur.

Tableau 5: Coefficients de transmission de chaleur des éléments de la double peau.

Les dalles sont comptées comme l'élément qui se trouve au-dessus. Le tableau 6 détaille les valeurs des pertes spécifiques façade par façade.

		Surface [m <sup>2</sup> ]	K <sub>iu</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	H <sub>iu</sub> [W/K]	K <sub>ue</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	H <sub>ue</sub> [W/K]	H <sub>ie</sub> [W/K]	K <sub>ie</sub> [W/m <sup>2</sup> K]
N-E :	D. p. ouv.	520	2.7	1410	2.9	1507	729	1.4
	D. p. ferm.	60	3.2	192	5.6	335	122	2.0
	D. p. att.	64	2.4	154	2.9	186	84	1.3
N-W :	D. p. ouv.	840	2.7	2292	2.9	2436	1181	1.4
	D. p. ferm.	94	3.2	301	5.6	528	192	2.0
	D. p. att.	103	2.4	248	2.9	299	136	1.3
S-W :	D. p. ouv.	677	2.7	1830	2.9	1964	947	1.4
	D. p. ferm.	69	3.2	221	5.6	387	141	2.0
	D. p. att.	48	2.4	114	2.9	138	62	1.3
S-E :	D. p. ouv.	736	2.7	2014	2.9	2134	1036	1.4
	D. p. ferm.	89	3.2	285	5.6	500	182	2.0
	D. p. att.	102	2.4	244	2.9	295	134	1.3
	Total:	3400					4950	1.5

$K_{iu}$ : coefficient de transmission de chaleur de l'intérieur dans la double peau.

$K_{ue}$ : coefficient de transmission de chaleur de la double peau à l'extérieur.

$K_{ie}$ : coefficient de transmission de chaleur de l'intérieur à l'extérieur à travers la double peau.

Tableau 6: Pertes spécifiques de la double peau sans ventilation.

### 9.2: Sensibilité des pertes spécifiques à la ventilation de la double peau

La double peau ouverte a une hauteur variant entre 13 et 21 m. L'air à l'intérieur est réchauffé par les pertes du bâtiment et les gains solaires, et se met à circuler par effet cheminée. La mesure d'un profil de vitesse montre qu'il s'agit bien d'un flux d'air vertical et pas d'une circulation interne de l'air.

La figure 2 montre les vitesses d'air en moyennes horaires, mesurées dans la double peau du 20 novembre au 16 décembre 1991. Les jours durant lesquels l'ensoleillement dans le plan de la façade dépasse 130 W/m<sup>2</sup> (pendant une heure au moins) sont marqués d'une flèche verticale. Le vent, relevé à Cointrin sur la base de 4 mesures journalières, est marqué d'une flèche horizontale durant les périodes où il a soufflé à plus de 10 noeuds (18.5 km/h).

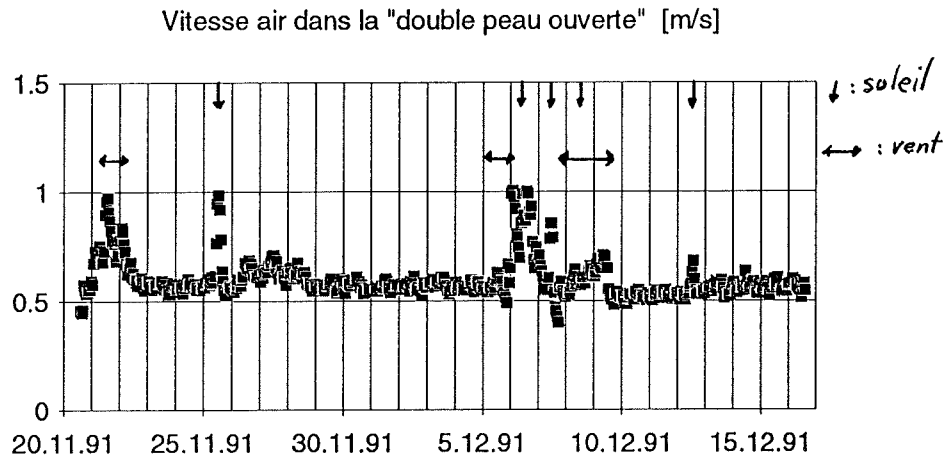


Figure 2: mesures de la vitesse de l'air en moyennes horaires à l'intérieur de la double peau.

Sur toute la période de mesure, la vitesse moyenne est de 0.6 m/s. Le vent est également un "moteur" de la ventilation dans la double peau.

La ventilation a pour effet de "court-circuiter" la peau extérieure. On peut définir un coefficient de transmission de chaleur effectif  $K_{ie\text{ eff}}$  qui tient compte également des pertes par ventilation. La figure 3 montre la dépendance de ce  $K_{ie\text{ eff}}$  en fonction de la vitesse de l'air dans la double peau.

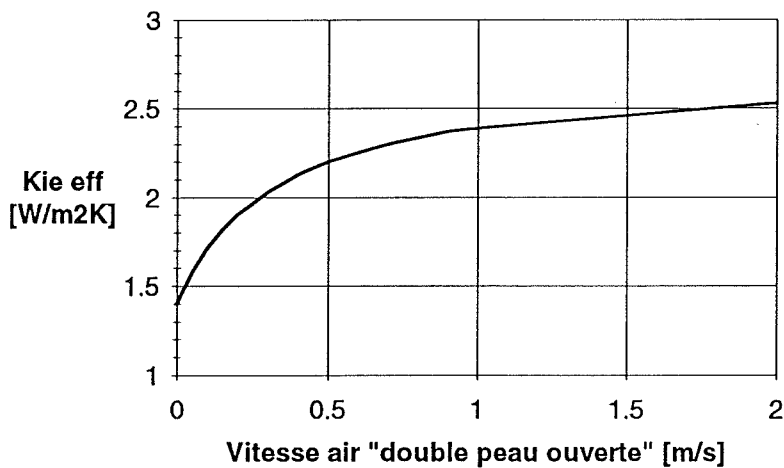


Figure 3: Coefficient de transmission de chaleur effectif de la double peau ouverte en fonction de la vitesse de l'air qui la traverse.

### 9.3: Pertes spécifiques totales de la double peau.

Le coefficient de transmission de chaleur effectif dépend de la température intérieure, extérieure, des apports solaires et du vent via la vitesse de l'air dans la double peau. Le modèle de la serre montré à la figure 1 permet de calculer ce coefficient connaissant cette vitesse. On peut toutefois se demander quelle est la validité de ce modèle puisque la vitesse de l'air modifie également les coefficients de transferts superficiels. A défaut d'avoir de meilleures connaissances sur la vitesse de l'air dans la double peau, la valeur moyenne de 0.6 m/s est prise comme valeur constante tout au long de la saison de chauffage. Par ailleurs une vitesse nulle est attribuée aux modules double peau qui sont fermés hermétiquement. L'inventaire des modules double peau ouverts et fermés façade par façade conduit au tableau 7.

		Surface [m <sup>2</sup> ]	Kiu [W/m <sup>2</sup> K]	Hiu [W/K]	Kue eff [W/m <sup>2</sup> K]	Hue [W/K]	Hie [W/K]	Kie eff [W/m <sup>2</sup> K]
N-E :	D. p. ouv.	520	2.7	1410	6.7	3495	1005	1.9
	D. p. ferm.	60	3.2	192	5.6	335	122	2.0
	D. p. att.	64	2.4	154	2.9	186	84	1.3
N-W :	D. p. ouv.	840	2.7	2292	9.7	8116	1787	2.1
	D. p. ferm.	94	3.2	301	5.6	528	192	2.0
	D. p. att.	103	2.4	248	2.9	299	136	1.3
S-W :	D. p. ouv.	677	2.7	1830	6.0	4056	1261	1.9
	D. p. ferm.	69	3.2	221	5.6	387	141	2.0
	D. p. att.	48	2.4	114	2.9	138	62	1.3
S-E :	D. p. ouv.	736	2.7	2014	13.4	9896	1673	2.3
	D. p. ferm.	89	3.2	285	5.6	500	182	2.0
	D. p. att.	102	2.4	244	2.9	295	134	1.3
Total		3400					6780	2.0

Kue eff: coefficient de transmission de chaleur effectif de la double peau à l'extérieur (incluant les pertes par ventilation).

Kie eff: coefficient de transmission de chaleur effectif de l'intérieur à l'extérieur à travers la double peau (incluant les pertes par ventilation).

Tableau 7: Pertes spécifiques de la double peau avec ventilation.

La ventilation de la double peau fait passer le coefficient de transmission de chaleur moyen de 1.5 à 2 W/m<sup>2</sup> K.



## 10: Gains solaires, surfaces équivalentes de captation.

Les gains solaires sont calculés avec la relation de base suivante:

$$Q_s = \sum_j q_{sj} \cdot \sum_i A_{eij}$$

[MJ]    [MJ/m<sup>2</sup>]    [m<sup>2</sup>]

La première somme est effectuée sur toutes les orientations  $j$  et la deuxième sur toutes les surfaces  $i$  qui collectent le rayonnement solaire.

$q_{sj}$  est l'énergie mensuelle totale de rayonnement solaire global reçue par une surface unité d'orientation  $j$ .

$A_{eij}$  est la surface équivalente de la surface  $i$  d'orientation  $j$ .

### 10.1: Vitrages ordinaires.

La surface équivalente d'une fenêtre est donnée par:

$$A_{ei} = (1-s_j) F_{ci} F_{fi} g_i A_i$$

où:

$s_j$  est le facteur d'ombrage permanent de la fenêtre (ombrage à l'extérieur de la fenêtre)

$F_{ci}$  est le facteur de rideau permanent.

$F_{fi}$  est le facteur de réduction des cadres de fenêtre. C'est le rapport de la surface de vitrage sur la surface totale de la fenêtre.

$g_i$  est le coefficient de transmission global pour le rayonnement solaire traversant la fenêtre  $i$ .

$A_i$  est la surface totale de la fenêtre.

Les surfaces équivalentes des différentes fenêtres sont calculées et figurent dans le tableau 8.

Doubles vitrages	Surface [m2]	g	Fci	Ffi	1-si	Aei [m2]
Façade N--E :	13	0.7	0.9	0.75	0.9	5.5
	56	0.7	0.9	0.30	0.9	9.6
	135	0.7	0.9	0.66	0.9	50.6
Total	205					<b>65.7</b>
Façade N--W :	147	0.7	0.9	0.30	0.9	24.9
	198	0.7	0.9	0.66	0.9	73.9
Total	344					<b>98.9</b>
Façade S--W :	37	0.7	0.9	0.30	0.9	6.3
	4	0.7	0.9	0.86	0.9	1.9
	151	0.7	0.9	0.66	0.9	56.6
Total	192					<b>64.8</b>
Façade S--E :	192	0.7	0.9	0.30	0.9	32.6
	170	0.7	0.9	0.66	0.9	63.4
Total	361					<b>96</b>

Tableau 8: Surfaces équivalentes des fenêtres et portes vitrées façade par façade.

Les quatres faces de l'immeuble sont relativement bien dégagées, les obstacles ne dépassant pas une hauteur de 10°; le facteur d'ombrage  $s_i$  se monte à 0.1 (annexe E, EN).

Aucun rideaux n'est installé, à l'exception de quelques rideaux intérieurs posés par certains locataires. Le facteur de rideaux est néanmoins fixé à 0.9 pour tenir compte des salissures des vitrages. Ces valeurs concernent également la double peau.

### 10.2: Double peau.

Les gains solaires de la double peau sont composés des gains solaires directs, par la fraction de rayonnement solaire qui la traverse, et des gains solaires indirects suite à l'échauffement de la double peau. Le modèle de la serre de la figure 1 permet d'écrire les gains solaires sous la forme:

$$Q_{SS} = Q_{sd} + (1-\xi) \cdot Q_{si} \quad \text{avec} \quad (1-\xi) = H_{iu} / (H_{ue} + H_{iu})$$

$Q_{SS}$  [MJ] : gains solaires totaux.

$Q_{sd}$  [MJ] : gains solaires directs.

$Q_{si}$  [MJ] : gains solaires dans la double peau

(rappel)  $H_{iu}$  [W/K]: perte spécifique de l'intérieur dans la double peau.

$H_{ue}$  [W/K]: perte spécifique de la double peau à l'extérieur  
(transmission et ventilation).

$(1-\xi)$  : fraction des gains absorbés par la double peau qui est transmise à l'intérieur.

La norme propose une formule un peu différente pour les gains solaires totaux:

$$Q_{ss} = \xi \cdot Q_{sd} + (1-\xi) \cdot Q_{si} \quad \text{avec} \quad \xi = H_{ue} / (H_{iu} + H_{ue})$$

$\xi$ : fraction des gains absorbés par la double peau qui est perdue à l'extérieur.

Les gains solaires directs  $Q_{sd}$  et les gains solaires dans la double peau  $Q_{si}$  sont explicités avec les formules suivantes:

$$Q_{sd} = q_s \cdot (1-s_d) \cdot F_{cd} \cdot F_{fd} \cdot F_{fi} \cdot g_d \cdot g_i \cdot A_d$$

$$Q_{si} = q_s \cdot (1-s_j) \cdot F_{ci} \cdot F_{fi} \cdot \alpha_i \cdot g_i \cdot A_i$$

Les symboles ont la même signification que pour les vitrages ordinaires, l'indice  $i$  étant relatif à la peau extérieure et  $d$  à la peau intérieure.  $A_d$  concerne les fenêtres de la peau intérieure.

$\alpha_i$  est l'absorption moyenne des parois de la double peau.

#### 10.2.1: Gains solaires indirects.

On peut définir une surface équivalente relative aux gains indirects. Les relations ci-dessus permettent d'écrire:

$$(1-\xi) \cdot Q_{si} = q_s \cdot (1-\xi) \cdot (1-s_j) \cdot F_{ci} \cdot F_{fi} \cdot \alpha_i \cdot g_i \cdot A_i$$

En posant  $A_{esi}$  pour la surface équivalente des gains indirects, on a :

$$A_{esi} = (1-\xi) \cdot (1-s_j) \cdot F_{ci} \cdot F_{fi} \cdot \alpha_i \cdot g_i \cdot A_i$$

La double peau "façade" dénote la double peau "ouverte" comptée avec la double peau "fermée". Cela signifie que l'on attribue au simple vitrage opaque un coefficient de transmission global  $g$  de 0.7 correspondant au double vitrage de la double peau "ouverte".

Le coefficient  $\alpha_i$  d'absorption moyenne de la double peau est déterminé en supposant que seules les surfaces opaques absorbent le rayonnement solaire. On suppose également qu'elles l'absorbent à 70%.

$$\alpha_i = 0.7 \cdot (A_i - A_v) / A_i$$

$A_i$ : surface de la peau intérieure.

$A_v$ : surface des vitrages intérieurs.

Les surfaces équivalentes sont calculées dans le tableau 9.

Double peau Gains indirects	Surface [m <sup>2</sup> ]	$\alpha$	g	F <sub>ci</sub>	F <sub>fi</sub>	1-s <sub>i</sub>	(1- $\xi$ )	A <sub>esi</sub> [m <sup>2</sup> ]
N-E : D.p. faç.	580	0.40	0.7	0.9	0.84	0.9	0.29	32.6
D.p. att.	64	0.24	0.7	0.9	0.82	0.9	0.45	3.2
Total	644							35.8
N-W : D.p. faç.	945	0.41	0.7	0.9	0.85	0.9	0.23	43.1
D.p. att.	103	0.23	0.7	0.9	0.84	0.9	0.45	5.1
Total	1048							48.2
S-W : D.p. faç.	746	0.39	0.7	0.9	0.85	0.9	0.32	44.3
D.p. att.	48	0.24	0.7	0.9	0.82	0.9	0.45	2.4
Total	794							46.7
S-E : D.p. faç.	825	0.41	0.7	0.9	0.84	0.9	0.18	29.2
D.p. att.	102	0.22	0.7	0.9	0.85	0.9	0.45	4.9
Total	927							34.1

Tableau 9: Surfaces équivalentes  $A_{esi}$  correspondant aux gains solaires indirects.

#### 10.2.2: Gains solaires directs.

On calcule la surface équivalente une fois avec le modèle de la serre  $A_{esd}$  et une fois comme la norme le prescrit  $A_{esd}'$ .

$$A_{esd}' = \xi A_{esd} \quad \text{et}$$

$$A_{esd} = (1-s_d) \cdot F_{cd} \cdot F_{fd} \cdot F_{fi} \cdot g_d \cdot g_i \cdot A_d$$

Le tableau 10 donne les surfaces équivalentes correspondantes.

Double peau Gains directs	Surface [m <sup>2</sup> ]	gi*Ffi	gd	Fcd	Ffd	1-sd	Aesd [m <sup>2</sup> ]	ξ	Aesd' [m <sup>2</sup> ]
N--E : D.p. faç.	295	0.59	0.7	0.81	0.83	0.9	73.5	0.71	51.9
D.p. att.	58	0.57	0.7	0.81	0.74	0.9	12.5	0.55	6.8
Total	353						86.0		58.7
N--W : D.p. faç.	474	0.60	0.7	0.81	0.84	0.9	120.8	0.77	92.9
D.p. att.	94	0.59	0.7	0.81	0.75	0.9	21.0	0.55	11.5
Total	567						141.9		104.4
S--W : D.p. faç.	333	0.60	0.7	0.81	0.83	0.9	83.9	0.68	57.4
D.p. att.	31	0.57	0.7	0.81	0.74	0.9	6.8	0.55	3.7
Total	364						90.7		61.1
S--E : D.p. faç.	339	0.59	0.7	0.81	0.84	0.9	85.3	0.82	69.9
D.p. att.	70	0.60	0.7	0.81	0.75	0.9	15.9	0.55	8.7
Total	408						101.2		78.6

Tableau 10: Surfaces équivalentes  $A_{esd}$  et  $A_{esd}'$  correspondant aux gains solaires directs.

La surface équivalente calculée selon la EN dépend fortement de la ventilation de la double peau. Elle diminue à mesure que la ventilation diminue. Le tableau 11 montre comment elle varie en fonction du nombre de modules double peau ouverts (on suppose une vitesse de l'air de 0.6 m/s pour les modules ouverts).

	Modèle Serre $\Sigma A_{esd}$ [m <sup>2</sup> ]		EN $\Sigma A_{esd}'$ [m <sup>2</sup> ]	
Tous les modules bouchés	420	100%	227	54%
Configuration actuelle (63% de modules ouverts)	420	100%	303	72%
Tous les modules ouverts	420	100%	326	78%

Tableau 11: Surface équivalente des 4 façades pour les gains directs à travers la double peau. Dépendance en fonction du nombre de modules ouverts.

A priori, pas de raisons physiques permettent de penser que cette surface soit dépendante de la ventilation de la double peau.

## 11: Température du bâtiment.

Les mesures de température du bâtiment sont fournies par les températures de contrôle de la régulation. Elles sont 4 par étage, régulant les 4 quarts d'étage situés aux 4 points cardinaux.

L'occupation des locaux fait que le rez-supérieur est équipé de 4 températures, le 3<sup>e</sup> étage et l'attique d'une seule température dans le quart ouest et les autres étages ne sont pas mesurés.

Seule la température du quart nord du rez-inférieur est mesurée en continue par la chaîne d'acquisition qui mesure les différents systèmes du bâtiment.

Ces températures, accumulées en mesures ponctuelles horaires depuis février 1990, ne mesurent que les locaux chauffés et habités. Elles ne permettent pas d'en déduire la température moyenne du bâtiment.

Depuis novembre 1991, 4 températures des locaux non chauffés sont installées. Deux sont placées au 2<sup>e</sup> étage, une au nord et une au sud, une au 3<sup>e</sup> étage, dans le quart nord et la dernière au centre de l'attique. Ces températures sont mesurées et enregistrées dans une petite boîte de la taille d'un paquet de cigarettes à raison de 1 mesure par heure.

Toutes ces températures ont été traitées en moyennes mensuelles avant de les comparer. La figure 4 montre l'évolution des températures du rez-supérieur en moyennes mensuelles. Les saisons de chauffage traitées avec la norme sont marquées d'une flèche horizontale

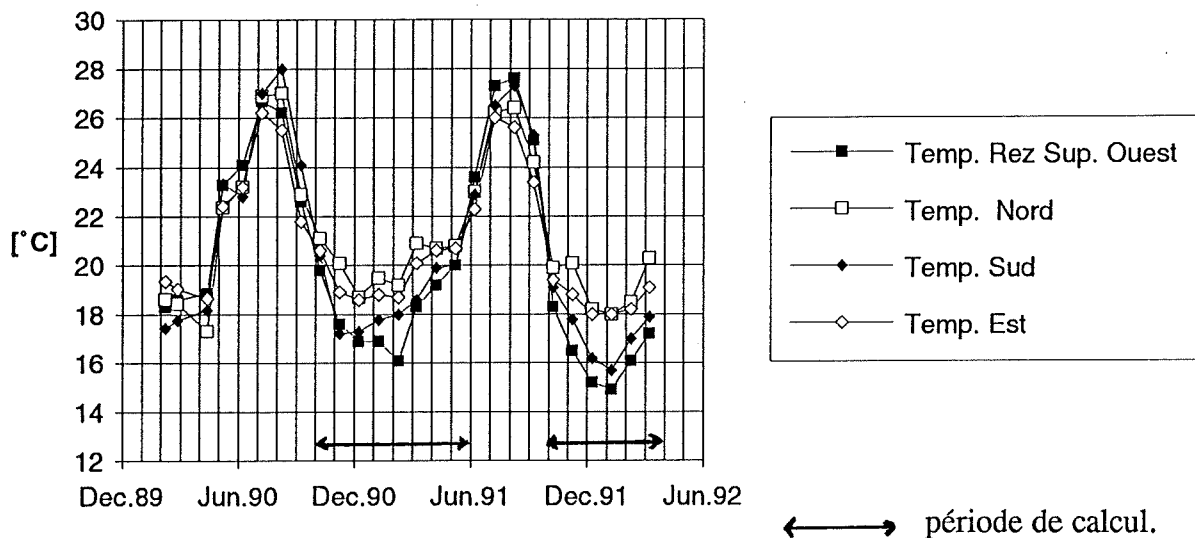


Figure 4: Evolution des températures du rez-supérieur, en moyennes mensuelles.

Le problème rencontré est l'inhomogénéité des températures. Des écarts de 10°C sont observés entre la température de 3<sup>e</sup> étage ouest et le rez-inférieur nord (fig.5).

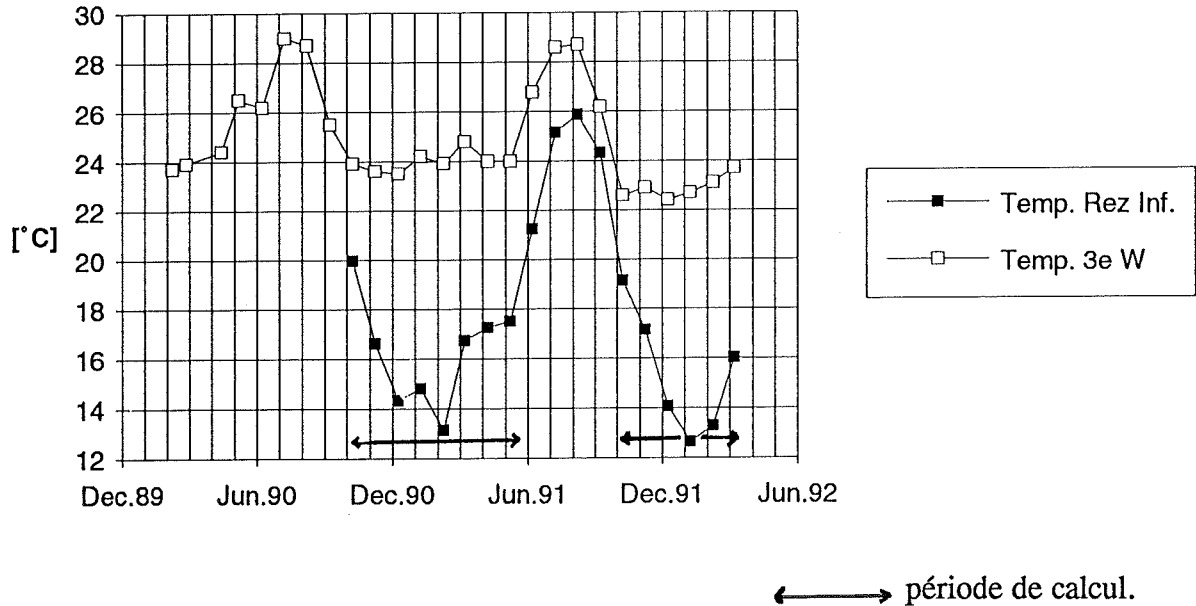


Figure 5: Evolution des températures du 3<sup>e</sup> étage ouest et du rez-inférieur nord, en moyennes mensuelles.

Toutes les autres températures du bâtiment sont comprises entre ces deux extrêmes. La norme propose de calculer la température moyenne du bâtiment en pondérant la température de chaque zone avec sa perte de chaleur spécifique.

$$\theta_i = \frac{\sum_k H_k \theta_{ik}}{\sum_k H_k}$$

$\theta_i$  [°C]: température intérieure du bâtiment.

$\theta_{ik}$  [°C]: température intérieure de la zone  $k$ .

$H_k$  [W/K]: perte de chaleur spécifique de la zone  $k$  (comprend les pertes par transmission, ventilation, le sol et les espaces non chauffés).

Une méthode plus simple consiste à pondérer la température de chaque zone avec la surface de la zone:

$$\theta_i = \frac{\sum_k S_k \theta_{ik}}{\sum_k S_k}$$

$S_k$  [m<sup>2</sup>]: surface de la zone  $k$ .

Les deux méthodes ont été appliquées et les températures moyennes sont montrées à la figure 6.

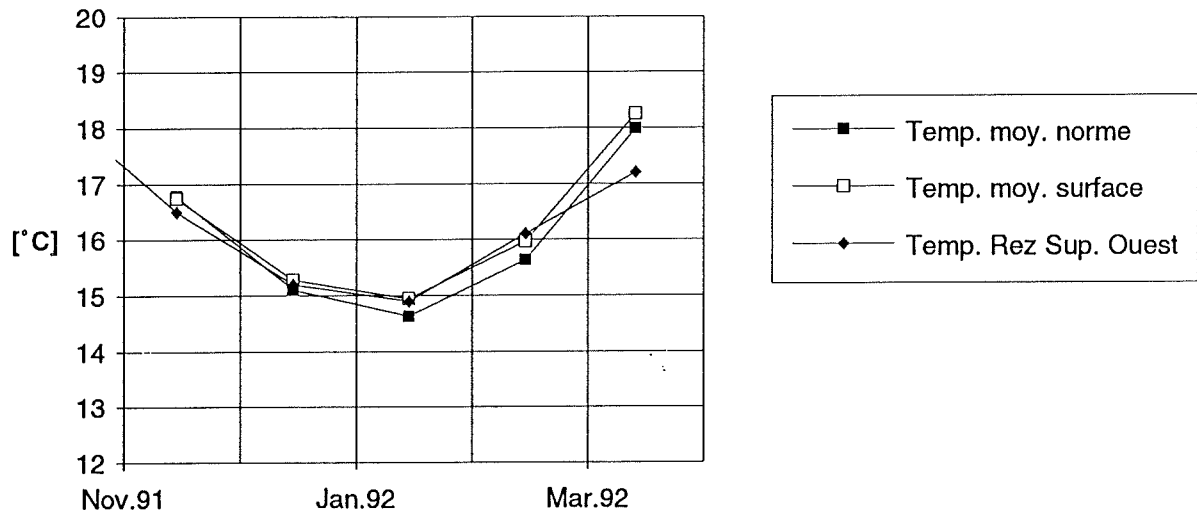


Figure 6: Température moyenne du bâtiment comparée avec la température du rez-supérieur quart ouest.

Les deux méthodes donnent des résultats compatibles. D'autre part, la température du rez-supérieur à l'ouest est proche de la température moyenne du bâtiment. Cette température est retenue pour tous les mois dont on ne peut pas calculer la température moyenne.

## 12: Détermination expérimentale des pertes de chaleur spécifiques $H_k$ [W/K] et d'une surface effective $S_{eff}$ [m<sup>2</sup>].

La chaîne d'acquisition de données mesure, entre autres, les énergies à l'entrée de la chaufferie (volume de gaz consommé par les chaudières et la PAC, chaleur déstockée par la PAC), et les chaleurs produites à la sortie de la chaufferie (chaleur basse et haute température) ainsi que divers variables météo (température extérieure, ensoleillements verticaux des 4 façades).

Les gains internes sont évalués sur la base d'un relevé hebdomadaire des compteurs électriques du bâtiment.



Dans un premier temps, la signature énergétique est tracée (fig.7). Le diagramme est évalué sur des moyennes hebdomadaires. Les puissances concernent les flux énergétiques à l'entrée de la chaufferie (gaz et chaleur déstockée), additionnés de la puissance électrique moyenne consommée (compteurs électriques). Le PCI du gaz est fixé à 36.2 MJ/m<sup>3</sup>, correspondant à la moyenne des valeurs mensuelles communiquées par les Services Industriels de Genève.

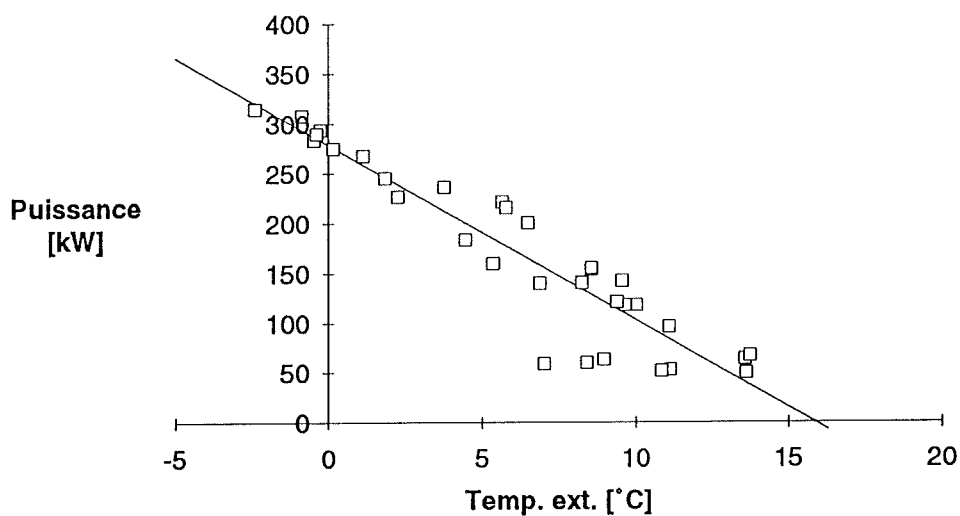


Figure 7: Signature énergétique. Mesures hebdomadaires, saison de chauffage 90-91.

La pente du diagramme (en valeur absolue) donne les besoins thermiques spécifiques du bâtiment [4]. Évaluée dans un intervalle de confiance à 95%, elle vaut:

$$H_k = 17.5 \pm 2.5 \text{ [kW/K]}$$

Pour tenir compte des gains solaires, il est préférable d'évaluer le diagramme H-M (fig.8). Les variables H et M sont également calculées sur des moyennes hebdomadaires.

La variable H (Heat demand) est la demande de chaleur nette divisée par la différence entre la température intérieure et extérieure  $\Delta T$ .

La demande de chaleur nette est obtenue en sommant les flux de chaleur à la sortie de la chaufferie (chaleur basse et haute température) avec la puissance électrique moyenne consommée (compteurs électriques). La variable M (Météo) est ici l'ensoleillement global vertical de la façade sud-est divisé par DT.

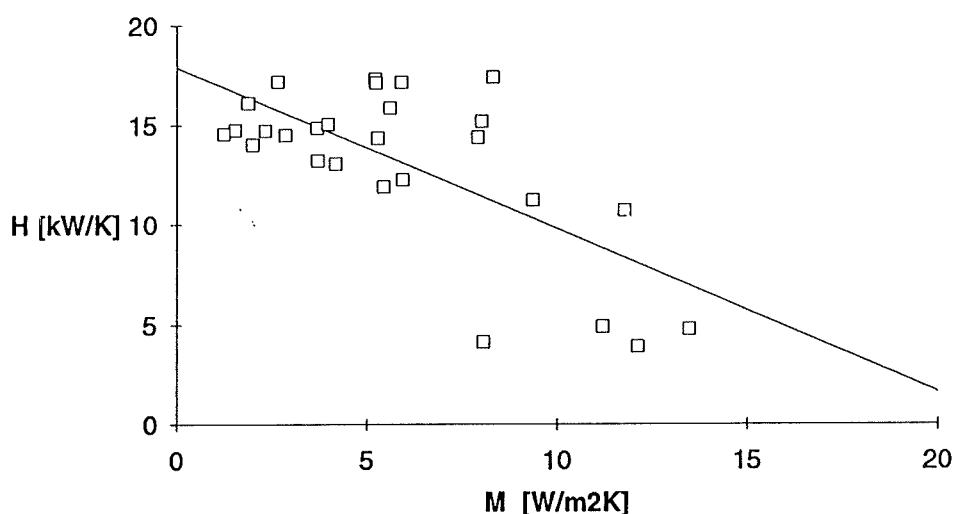


Figure 8: Diagramme H-M. Mesures hebdomadaires. Saison de chauffage 1990-1991.

Les points dont la composante météo est supérieure à 15 [W/m<sup>2</sup>·K] sont supprimés pour deux raisons: la perturbation des locataires (ouverture des fenêtres, etc....) devient non négligeable et le  $\Delta T$  trop faible relativement à son erreur.

L'ordonnée à l'origine fournit les besoins thermiques spécifiques du bâtiment  $H_k$  et la pente (en valeur absolue) donne la surface effective  $A_{eff}$  de captation relativement à l'ensoleillement global vertical de la façade sud-est. Les paramètres de la régression sont évalués avec un intervalle de confiance de 95%:

$$H_k = 17.9 \pm 1.2 \text{ [kW/K]}$$

$$A_{eff} = 810 \pm 360 \text{ [m}^2\text{]}.$$

La dispersion des points est importante. L'étape suivante serait d'évaluer l'influence de l'imprécision de la température intérieure sur la régression. Par ailleurs nous avons vu que le coefficient de transmission de chaleur effectif de la double peau est très influencé par sa ventilation. Il faudrait également tenir compte du vent et effectuer une régression multiple. Néanmoins le diagramme H-M donne un ordre de grandeur de la surface effective.

### **13: Calculs avec la norme.**

Pour chaque mois:

- les pertes totales du bâtiment  $Q_l$  sont calculées avec:

$$Q_l = H_k \cdot \Delta\theta \cdot t + \Sigma Q_a$$

$H_k$  [W/K]: pertes spécifiques totales du bâtiment (pertes par transmission, ventilation, le sol (négligées) et les espaces non chauffés).

$\Delta\theta$  [K]: différence de température en moyenne mensuelle entre l'intérieur et l'extérieur (mesurés).

$t$  [s]: durée du mois.

$\Sigma Q_a$  [J]: énergie gagnée ou perdue à travers le sol (stock souterrain et parking).

- les gains solaires  $Q_s$  sont calculés avec les surfaces équivalentes et les ensoleillements mesurés des 4 façades (voir 10: Gains solaires). Les gains internes  $Q_{int}$  sont évalués sur la mesure des compteurs électriques.

- un facteur d'utilisation  $\eta$  est calculé pour les gains.

- la demande de chaleur nette du bâtiment est calculée avec

$$Q_h = Q_l - \eta (Q_{int} + Q_s)$$

Les deux mois extrêmes sont tronqués à la période de chauffage uniquement. Un calcul annuel est aussi possible en effectuant la même démarche mais appliquée à la saison de chauffage. Avant de commencer les calculs il faut pouvoir calculer le facteur d'utilisation qui dépend, évidemment, du rapport gain sur perte  $\gamma$  et de la constante de temps du bâtiment  $\tau$ .

13.1: Constante de temps du bâtiment.

La constante de temps  $\tau$  s'obtient avec:

$$\tau = C/H_k$$

$H_k$  [W/K]: pertes spécifiques totales du bâtiment.

$C$  [J/K]: capacité thermique effective du bâtiment.

La somme des pertes spécifiques calculées ci-dessus donne 18'800 [W/K]. La capacité est évaluée sur les 10 premiers centimètres de la structure portante du bâtiment. Le tableau 12 mentionne toutes ces valeurs.

Structure portante	Volume [m <sup>3</sup> ]	Capacité [MJ/K]	Pertes spécifiques totales [kW/K]
Dalle	3'100	8'030	18.8
Piliers	160	410	Constante de temps [h]
Contrecoeur	80	210	
Total	3'340	8'650	130

Tableau 12: Capacité effective, pertes spécifiques totales et constante de temps du bâtiment.

13.2: Facteur d'utilisation:

Il est calculé avec:

$$\eta = (1 - \gamma^a) / (1 - \gamma^{a+1}) \quad \text{si } \gamma < > 1$$

$$\eta = a / (1+a) \quad \text{si } \gamma = 1$$

( $\gamma$ : rapport gains sur pertes)

et  $a = a_0 + \tau/\tau_0$ .

Les paramètres  $a_o$  et  $\tau_o$  ne prennent pas les mêmes valeurs suivant que l'on effectue un calcul mensuel ou annuel:

	$a_o$	$\tau_o$ [h]
Calculs mensuels	1	16
Calcul annuel	0,8	28

### 13.3: Calculs mensuels.

Les pertes spécifiques calculées  $H_k$  sont en bon accord avec les mesures:

	$H_k$ [kW/K]
Calculs	18.8
Diagr. H-M	17.9 +/- 1.2

Etant donné les approximations faites, la valeur obtenue par calcul est à prendre avec un bon 10% d'erreur. Les calculs sont effectués pour la saison de chauffage 1990-91, d'octobre à mai, et pour la saison en cours, d'octobre 91 à mars 92. La demande nette de chaleur  $Q_h$  est comparée à la chaleur fournie dans le bâtiment, à la sortie de la chaufferie (chaleur basse et haute température). Les résultats des calculs figurent dans le tableau 13:

	T int [°C]	T ext [°C]	Ql [GJ]	Qint [GJ]	Qs [GJ]	$\eta$	Qh calc. [GJ]	Qh mes. [GJ]	% plus
Oct.90	19.4	12.3	277	57	101	1.00	119	125	-4
Nov.90	17.6	5.9	559	93	76	1.00	390	340	15
Dec.90	16.9	1.6	759	86	90	1.00	582	526	11
Jan.91	16.9	3.0	698	99	53	1.00	546	484	13
Feb.91	16.1	1.1	690	91	127	1.00	473	495	-4
Mar.91	18.3	8.8	503	80	145	1.00	278	231	20
Apr.91	19.2	10.2	464	66	240	0.99	160	89	80
May.91	19.3	11.4	350	51	219	0.98	86	43	102
Total			4300	620	1050		2630	2330	13
									% plus
Oct.91	17.5	8.5	248	36	73	1.00	139	149	-7
Nov.91	16.8	6.1	511	74	60	1.00	376	357	6
Dec.91	15.1	2.0	638	77	68	1.00	492	512	-4
Jan.92	14.6	1.1	671	76	69	1.00	525	564	-7
Feb.92	15.6	4.1	555	73	137	1.00	345	445	-23
Mar.92	18.0	8.4	508	70	168	1.00	271	141	92
Total			3130	410	580		2150	2170	-1

Tableau 13: Calculs avec la EN et comparaison avec la chaleur fournie dans le bâtiment.

Un calcul annuel donne exactement le même résultat. On peut évaluer la surface effective de captage en divisant les gains solaires totaux par l'ensoleillement global vertical de la façade sud-est. On trouve:

$$A_{\text{eff}} = 660 \text{ m}^2 \quad \text{saison 90-91.}$$

$$A_{\text{eff}} = 620 \text{ m}^2 \quad \text{saison 91-92.}$$

A noter que les gains solaires directs de la double peau ont été évalués avec la surface équivalente  $A_{\text{egd}}$ , calculée sans la pondération par le facteur  $\xi$ , comme le prescrit la EN. En tenant compte de ce facteur, les surfaces effectives diminuent à:

$$A_{\text{eff}} = 580 \text{ m}^2 \quad \text{saison 90-91.}$$

$$A_{\text{eff}} = 550 \text{ m}^2 \quad \text{saison 91-92} \quad \text{effet qui se répercute}$$

sur la demande annuelle de chauffage avec, cette fois 18% de plus que la demande mesurée pour la saison 90-91 et 2% pour 91-92. Pour tous les calculs qui suivront, ce facteur sera ignoré. Les calculs surestiment la demande de chauffage de l'hiver 90-91. Or, le nombre de modules double peau fermés n'était pas le même durant cet hiver. Un certain nombre de ces modules ont été ouverts durant l'année pour ventiler la double peau. Malheureusement l'inventaire des modules fermés et ouverts n'a été fait que cet hiver (63% des modules sont ouverts).

En supposant que seulement 15% des modules étaient ouverts durant l'hiver 90-91, (répartis également sur les 4 façades), les calculs montrent un bilan exact avec:

$$17.8 \text{ kW/K} \quad \text{pour les pertes spécifiques totales et}$$

$$710 \text{ m}^2 \quad \text{de surface effective.}$$

Ces valeurs concordent étonnamment bien avec celles du digramme H-M. En même temps, on s'aperçoit que le bâtiment est très sensible à ces ouvertures.

#### **14: Sensibilité aux ouvertures de la double peau.**

On peut varier la fraction des modules ouverts et regarder les répercussions sur les pertes spécifiques du bâtiment, la surface effective (sensibilité des gains solaires indirects) et la demande annuelle de chauffage. La fraction de modules double peau ouverte est la même sur les 4 façades. La vitesse de l'air dans la double peau est supposée égale à 0.6 m/s dans les modules ouverts et quasi-nulle dans les modules fermés (0.004 m/s correspondant à un taux de renouvellement d'air de l'ordre de 1 h<sup>-1</sup>). Ces effets sont calculés pour la saison de chauffage 90-91 et figurent dans le tableau 14.

Ouverture de la double peau	Pertes spécifiques		Surface effective		Demande annuelle de chauffage	
	[kW/K]		[m <sup>2</sup> ]		[GJ]	
0%	17.0	100%	750	100%	2100	100%
15%	17.7	104%	710	95%	2330	111%
30%	18.2	107%	690	92%	2450	117%
50%	18.6	109%	670	89%	2580	123%
70%	18.9	111%	650	87%	2670	127%
100%	19,3	114%	630	84%	2790	133%

Tableau 14: Influence du pourcentage de modules double peau ouverts sur les pertes spécifiques, la surface effective et la demande annuelle de chauffage pour l'hiver 90-91.

La ventilation de la double peau, indispensable en été, a des effets négatifs qui se cumulent en hiver, en augmentant les pertes spécifiques et en diminuant la surface effective.

On peut faire le même raisonnement pour une fraction de modules ouverts fixe (par exemple 63% comme c'est le cas actuellement) et en faisant varier la vitesse de l'air dans la double peau.

On a vu (fig.2) que le vent peut faire monter la vitesse de l'air de 0.6 à 1 m/s, rendant le bâtiment d'autant plus sensible à son action.

D'autre part, les gains solaires sont dévalorisés pour la même raison, puisque la vitesse de l'air peut passer du simple au double lors de beaux jours. A titre d'exemple, avec la fraction actuelle ouverte, une vitesse de l'air de 1 m/s augmente les pertes spécifiques de 18.8 à 19.2 [kW/K] (+2%) et diminue la surface effective de 660 à 630 [m<sup>2</sup>] (-5%).



### **15: Sensibilité à différents paramètres.**

Les calculs avec la EN du tableau 14 pour l'hiver 90-91 sont considérés comme le cas nominal, bien que le taux d'ouverture des modules double peau (63%) soit supérieur à la réalité. Le tableau 15 montre la variation relative de la demande de chaleur  $Q_h$  causée par les variations de différents paramètres:

Variation du paramètre	Variation relative de la demande de chauffage annuelle
Température intérieure: +1°C	+ 14%
Vitesse air d.p.: + 0.1 m/s	+ 2%
Pertes spécifiques $H_k$ : + 10%	+ 16%
Surface effective $S_{eff}$ : + 10%	- 4%

Tableau 15: Sensibilité de différents paramètres sur la demande annuelle de chauffage.

La température intérieure et les pertes spécifiques sont les paramètres les plus sensibles.

### **16: Recommandations SIA.**

La recommandation SIA 180/1 (1980) permet d'évaluer la qualité de l'enveloppe d'un bâtiment en calculant un coefficient K moyen admissible, dépendant de la forme, du climat et de la température intérieure du bâtiment.

Appliqué au bâtiment, cette valeur limite vaut:

$$K_{adm} = 1,23 \text{ [W/m}^2\text{K]} \text{ pour une température intérieure de } 18^\circ\text{C.}$$

$$K_{adm} = 1,29 \text{ [W/m}^2\text{K]} \text{ pour une température intérieure de } 17^\circ\text{C.}$$

La recommandation donne également une méthode de calcul pour déterminer le coefficient K moyen de l'enveloppe, en tenant compte de facteurs d'ensoleillement pour les fenêtres et de coefficient de réduction suivant le milieu qui borde l'enveloppe.

Les portes-vitrées et la double peau sont comptabilisées comme les fenêtres du point de vue gains solaires, à l'exception de la double peau opaque. La ventilation de la double peau n'intervient pas dans les calculs. Le tableau 16 donne le K moyen des différents éléments de l'enveloppe.

Eléments	Surface [m <sup>2</sup> ]	K moyen [W/m <sup>2</sup> k]
D.p. N-E	644	1.45
D.p. N-W	1'038	1.45
D.p. S-W	794	1.07
D.p. S-E	927	1.08
Reste	6900	1.24
Total	10'300	1.25

Tableau 16: K moyen des différents éléments de l'enveloppe calculés avec la recommandation SIA 180/1.

Le K moyen calculé est admissible si la température intérieure n'excède pas 17°C. Ce sont les doubles peaux des façades nord-est et nord-ouest qui ont des K moyens trop élevés.

La recommandation SIA 380/1 donne des valeurs limites pour la demande de chauffage annuelle pour différents types d'ouvrages. Le bâtiment étudié entre dans la catégorie d'ouvrage IV, correspondant aux bâtiments industriels. La demande d'énergie pour le chauffage, correction d'altitude effectuée, ne doit pas dépasser 235 [MJ/m<sup>2</sup>a].

La méthode de calcul est appliquée avec les caractéristiques du bâtiment calculées précédemment et, cette fois, les données climatiques tabulées pour Genève. La température intérieure moyenne de la saison de chauffage 90-91 étant de 17.9°C, les données climatiques se rapportent aux valeurs-limites de chauffage de 18/10. Le tableau 17 donne le bilan annuel (la surface de référence est de 18'400 m<sup>2</sup>).

Pertes	Gains internes (mesurés)	Gains solaires	Facteur d'utilisation	Demande de chauffage
MJ/m <sup>2</sup> a	MJ/m <sup>2</sup> a	MJ/m <sup>2</sup> a		MJ/m <sup>2</sup> a
220	18	33	0,93	173

Tableau 17: Bilan annuel selon la recommandation SIA 380/1.

Le bâtiment est conforme à la recommandation. A titre de comparaison, la demande de chauffage de l'hiver 90-91 s'est montée à 130 [MJ/m<sup>2</sup>a]. Cette basse valeur est essentiellement due à une température intérieure plus basse pendant les mois les plus froids (16-17 au lieu de 18°C) et à des pertes spécifiques moins importantes (-5%) que celles qui sont obtenues pour l'hiver 91-92 (prises dans le calcul). Il faut toutefois considérer ces valeurs avec prudence du fait de l'inhomogénéité des températures à l'intérieur du bâtiment.

### **17: Conclusion.**

Le centre Industriel et Artisanal Marcinhès est un immeuble qui est d'autant plus complexe qu'il n'est pas achevé. Le chauffage et la régulation partielle du bâtiment se traduit par une inhomogénéité des températures intérieures qui rend difficile l'évaluation de la température moyenne équivalente.

Les basses températures observées au rez-inférieur font que l'on devrait le considérer comme une zone différente. Néanmoins l'approche de la zone unique est satisfaisante, livrant des résultats compatibles avec les mesures. Le diagramme H-M est toutefois nécessaire pour vérifier que les pertes spécifiques totales et la surface équivalente obtenues sont compatibles. L'application de la EN en traitant la double peau comme une serre permet de mettre en évidence les effets de ventilation sur cette dernière.

Cependant, on peut se demander si la double peau se comporte vraiment comme une serre. Les réflexions multiples et les coefficients de transferts superficiels dépendant de la vitesse de l'air ne sont pas pris en compte dans le modèle. En ce qui concerne les gains solaires indirects, ce sont d'abord les parois de la double peau qui

absorbent le rayonnement solaire, et l'air y est ensuite chauffé indirectement. Un seul noeud dans la double peau ne suffit pas pour tenir compte des effets dynamiques; en revanche il se prête bien à l'utilisation de moyenne mensuelles. La difficulté revient à chercher et utiliser les moyennes adéquates des paramètres clefs. On pourrait envisager d'utiliser un modèle plus fin (en tenant compte de la géométrie particulière de la double peau) pour ajuster les paramètres utilisés dans le modèle de la serre à des valeurs moyennes qui tiennent compte des effets mentionnés ci-dessus.

Beaucoup d'approximations ont été faites, comme en particulier de prendre la vitesse de l'air constante dans la double peau. La EN ne donne certainement pas de bons résultats sur les proportions des gains directs et indirects ni sur la précision de différentes contributions, mais en revanche donne des résultats satisfaisants sur la demande de chaleur annuelle. Elle est particulièrement intéressante pour évaluer l'impact d'un paramètre sur cette dernière.

Le bâtiment satisfait à la recommandation SIA 180/1 pour autant qu'il ne soit pas chauffé à une température supérieure de 17°C. Les points critiques sont la double peau des façades nord-est et nord-ouest. La recommandation SIA 380/1 est facilement respectée avec une demande de chaleur de 173 [MJ/m<sup>2</sup>a]. Il ne faut pas perdre de vue que ce bâtiment est toujours en cours d'achèvement et qu'il n'est pas complètement occupé.

### **18: Annexe 1: le bâtiment.**

L'immeuble est destiné à être loué par lots à de petites ou moyennes entreprises pour un usage d'ateliers ou de locaux de production. Il se présente comme un bloc rectangulaire de six niveaux, plus un demi-niveau de parking sous le rez-inférieur (fig.9). Un stockage saisonnier de chaleur souterrain est placé sous l'autre moitié du rez-inférieur. Le dernier étage (attique), légèrement en retrait, laisse une coursive de 2m, sur tout le pourtour du bâtiment. L'axe principal est orienté au sud-ouest.

Hormis des contrecœurs en béton faisant office d'accumulateurs de chaleur, la structure en béton armé, montée sur piliers, est exempte de murs en façades.

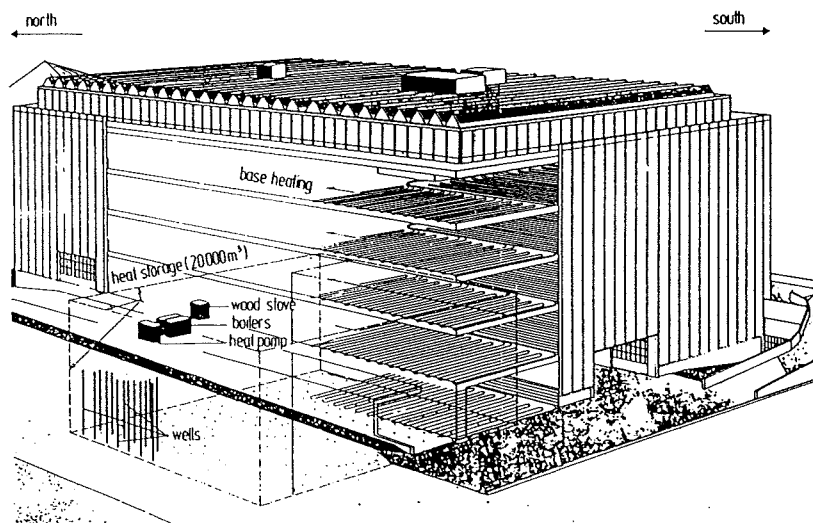


Figure 9: Vue générale du bâtiment.

Les façades en "double-peau" présentent une peau intérieure constituée, à chaque étage, d'un double vitrage isolant monté sur un contrecœur, et une peau extérieure, en double vitrage isolant, placée à 25 cm de la première. La peau extérieure est fixée sur la peau intérieure par une structure verticale à ponts thermiques coupés et espacée tous les 1.5m. Entre les deux peaux, une protection solaire est placée contre la peau extérieure.

En modules de 1.5 m de largeur, la double peau est pourvue d'une ouverture en bas et en haut de la façade (à l'exception de l'attique), permettant une ventilation naturelle des deux peaux par effet cheminée. Des fenêtres en double vitrage isolant sont en alternance avec des groupes de deux ou trois modules double peau, et permettent l'aération des locaux. Les dimensions, surfaces et volumes du bâtiment sont indiqués dans le tableau 18.

	Dimension brutes [m]x[m]	Surfaces <sup>1)</sup> [m <sup>2</sup> ]	Hauteur sous plafond [m]	Epaisseur dalle [m]	Volume net <sup>2)</sup> [m <sup>3</sup> ]
Attique	65.3 x 41.3	2'700	3.70	0.50	9'860
3 <sup>e</sup> étage	69.3 x 45.3	3'140	3.60	0.50	11'170
2 <sup>e</sup> étage	69.3 x 45.3	3'140	3.60	0.50	11'170
1 <sup>er</sup> étage	69.3 x 45.3	3'140	3.78	0.52	11'730
Rez sup.	69.3 x 45.3	3'140	3.76	0.56	11'670
Rez inf.	69.3 x 45.3	3'140	4.10	-	12'730
<b>Total</b>		<b>18'400</b>	<b>22.54</b>	<b>2.58</b>	<b>68'330</b>
Parking		1'600	2.10		3'660
Stock sout.		1'500	14.50		21'800
<b>Façade N-E</b>	Surface [m <sup>2</sup> ]	Pourcent.	<b>Façade N-W</b>	Surface [m <sup>2</sup> ]	Pourcent.
Double peau	645	58%	Double peau	1'040	60%
Fenêtres	205	18%	Fenêtres	200	12%
Reste	270	24%	Reste	490	28%
<b>Total</b>	<b>1'120</b>	<b>100%</b>	<b>Total</b>	<b>1'730</b>	<b>100%</b>
<b>Façade S-W</b>	Surface [m <sup>2</sup> ]	Pourcent.	<b>Façade S-E</b>	Surface [m <sup>2</sup> ]	Pourcent.
Double peau	790	71%	Double peau	930	54%
Fenêtres	160	14%	Fenêtres	170	10%
Reste	170	15%	Reste	630	36%
<b>Total</b>	<b>1'120</b>	<b>100%</b>	<b>Total</b>	<b>1'730</b>	<b>100%</b>

1) les dimensions sont mesurées à l'extérieur de la peau intérieure.

2) le volume est obtenu avec les dimensions intérieures.

Tableau 18: Dimensions, surfaces et volumes du bâtiment.

En ce qui concerne la conception énergétique, la stratégie globale, exposée en détail dans la réf [1], consiste à réduire au maximum la demande d'énergie de chauffage pour mieux exploiter les énergies renouvelables. Il est prévu de couvrir les besoins de chauffage par:

- le solaire passif, principalement l'enveloppe "double-peau" (24%),
- le solaire actif couplé à un stockage saisonnier (21%),
- les gains internes (19%),

- les déchets de bois (6%),
- le reste étant assuré par l'énergie fossile (gaz ou fuel, 29%).

Le système de chauffage est composé d'un chauffage de base, à basse température (30-50 °C) et d'un chauffage d'appoint à haute température (70-80 °C). Une pompe à chaleur à gaz de 215 kW assure la demande de chaleur du chauffage de base. Elle puise de la chaleur dans le stock saisonnier en terre, lui-même alimenté par 1'000 m<sup>2</sup> de capteurs solaires en toiture.

Le chauffage d'appoint est couvert par deux chaudières à gaz/fuel de 230 kW chacune, ainsi qu'une chaudière à déchets de bois de 180 kW. A noter que ces chaudières assurent également les besoins du chauffage de base lorsque la pompe à chaleur est en panne.

Actuellement, toujours en cours d'achèvement, l'immeuble est environ à moitié loué. En conséquence, seuls les locaux occupés sont chauffés et régulés. D'autre part, comme signalé ci-dessus, le réseau de distribution d'eau chaude sanitaire n'est pas installé. Enfin, en ce qui concerne la double peau, les protections solaires ne sont pas installées et les ouvertures haut et bas ne sont pas montées. Elles sont soit ouvertes, soit obstruées par une plaque de sagex cellée avec un joint en silicone.

### **19: Références.**

[1] B. Matthey, C.-A. Roulet : A Passive Solar Industrial Building Combined with a 20'000 m<sup>3</sup> Seasonal Storage at Meyrin (Geneva). Third International Congress on Building Energy Management, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1987.

[2] Recommandation SIA 380/1. L'énergie dans le bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes. Zürich, 1988.

[3] C.-A. Roulet : Energétique du bâtiment I. Presses polytechniques romandes, 1987.

[4] C.-A. Roulet : Energétique du bâtiment II. Presses polytechniques romandes, 1987.

[5] Recommandation SIA 180/1 : Protection thermique des bâtiments en hiver. Société suisse des ingénieurs et des architectes. Zürich, 1980.

[6] Norme européenne. Residential Buildings - Energy Requirements for Heating - Calculation Method, Comité Européen de Standardisation, Brussels, 1991.