

Appels à Projets Basse Energie en Bourgogne

Rapport général de Bilan et de Synthèse des retours d'expérience



APPELS A PROJET **2006 – 2007 – 2008**



Le présent document a été rédigé par Enertech, pour le Conseil Régional de Bourgogne.

Sauf mention contraire, les photos et illustrations figurant dans ce document ont été réalisées par Enertech entre 2006 et 2015. Par défaut, les photos concernent des projets des Appels à Projets 2006, 2007 ou 2008 de la Région Bourgogne, sauf mention « Hors AAP ».

**Reproduction totale ou partielle interdite sans autorisation
du Conseil Régional de Bourgogne et d’Enertech.**

Version	Rédigé par	Relu par	Date
Plan détaillé	TR	DM	29/08/2013
Version 1	TR	DM	30/01/2015
Version finale	TR		12/01/2016



INGENIEURS CONSEILS
26160 Pont de Barret
☎ 04 75 90 18 54 – rieser@enertech.fr
Site Internet : www.enertech.fr

Siège social : 26160 Pont de Barret - Siret 41522792500021
SCOP ARL à capital variable - RCS B 415 227 925 - APE 7112 B - N° TVA intracommunautaire : FR 87415227925

Lexique des termes techniques utilisés	5
1 Objet.....	6
1.1 <i>Contexte et enjeux.....</i>	6
1.2 <i>Présentation des Appels à Projets</i>	7
1.2.1 <i>Présentation des 3 Appels à Projets</i>	7
1.2.2 <i>Des candidatures d'une grande qualité</i>	10
1.2.3 <i>Présentation de la mission de l'AMO</i>	11
1.3 <i>Objet du présent rapport</i>	13
2 La phase de conception	14
2.1 <i>Une nouvelle dynamique d'équipe.....</i>	14
2.1.1 <i>Ce qu'implique la conception basse consommation.....</i>	14
2.1.2 <i>L'implication du Maître d'ouvrage</i>	14
2.1.3 <i>L'équipe de maîtrise d'œuvre</i>	17
2.2 <i>La conception de l'enveloppe</i>	18
2.2.1 <i>La conception bio climatique.....</i>	19
2.2.2 <i>La Simulation Thermique Dynamique et le confort d'été</i>	26
2.2.3 <i>Performance des parois opaques.....</i>	34
2.2.4 <i>Le traitement des ponts thermiques</i>	40
2.2.5 <i>Performance des menuiseries</i>	46
2.2.6 <i>L'étanchéité à l'air et la migration de vapeur</i>	50
2.2.7 <i>Les particularités de la Rénovation.....</i>	69
2.3 <i>La conception des lots fluides.....</i>	71
2.3.1 <i>Un travail d'équipe entre BE et Architecte.....</i>	72
2.3.2 <i>Ventilation</i>	74
2.3.3 <i>Chauffage.....</i>	91
2.3.4 <i>Plomberie et ECS.....</i>	105
2.3.5 <i>Electricité spécifique</i>	111
2.3.6 <i>L'intégration des énergies renouvelables</i>	123
2.3.7 <i>Le calcul réglementaire et les labels</i>	133
2.3.8 <i>Le calcul des consommations tous usages de l'Appel à Projets 2008.....</i>	136
2.3.9 <i>Les particularités de la Rénovation.....</i>	140
2.4 <i>Qualité environnementale.....</i>	147
2.4.1 <i>Eléments de Qualité environnementale</i>	147
2.4.2 <i>Première approche de l'énergie grise / ACV du bâtiment.....</i>	154

3	Retours d'expérience du chantier	160
3.1	<i>Généralités.....</i>	160
3.2	<i>Réalisation de l'enveloppe.....</i>	164
3.2.1	Isolation, menuiseries	164
3.2.2	Etanchéité à l'air	168
3.2.3	Eléments de Qualité Environnementale.....	174
3.3	<i>Mise en œuvre des systèmes.....</i>	175
3.3.1	Généralités	175
3.3.2	Ventilation	175
3.3.3	Chauffage.....	184
3.3.4	Plomberie et ECS.....	187
3.3.5	Electricité spécifique	190
3.4	<i>Mise au point des installations techniques</i>	192
3.4.1	Généralités – qui fait quoi ?.....	192
3.4.2	Chauffage.....	192
3.4.3	Eau Chaude Sanitaire, installation solaire	196
3.4.4	Ventilation	197
3.4.5	Installations électriques	200
3.5	<i>Le passage de relais aux utilisateurs et à la maintenance</i>	201
3.5.1	Comment organiser la transmission des informations ?	201
3.5.2	Bonnes pratiques pour la maintenance	203
3.5.3	Questions sur la maintenance	207
4	Evaluation environnementale et économique des Appels à Projets.....	208
4.1	<i>Indicateurs environnementaux.....</i>	208
4.1.1	Méthodologie utilisée	208
4.1.2	Impact évité en énergie primaire	209
4.1.3	Impact climatique évité.....	210
4.2	<i>Indicateurs économiques</i>	211
4.2.1	Coût travaux en neuf.....	211
4.2.2	Coût travaux des logements en rénovation	216
4.2.3	Réflexions sur l'économie des projets	218
5	Conclusion : bilan général.....	219
5.1	<i>Leçons sur le fonctionnement de l'appel à projet.....</i>	219
5.2	<i>Bilan de l'appel à projet.....</i>	224
	Annexes.....	225

Lexique des termes techniques utilisés

APD : Avant Projet Définitif. Phase de la conception entre l'APS et le DCE.

APS : Avant Projet Sommaire. Phase de la conception entre l'Esquisse et l'APD.

ATEC : avis technique, portant sur un produit de construction spécifique (se substituant aux DTU).

BBC : Bâtiment à Basse Consommation, label de la réglementation RT 2005. Il se décline en neuf et en rénovation.

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières : pièce écrite du DCE décrivant les travaux à réaliser lot par lot.

COP : coefficient de performance : c'est le rapport de la chaleur produite par une pompe à chaleur sur sa consommation d'électricité.

Classement AEV : certification des menuiseries, définissant leur étanchéité à l'air (de A1 à A4, A4 étant la plus performante), à l'eau (E) et au vent (V).

DCE : Dossier de consultation des Entreprises. Phase de la conception entre l'APD et la consultation des entreprises. Désigne aussi l'ensemble des plans et pièces écrites servant à la consultation.

DET : Direction de l'Exécution des Travaux. Phase de suivi du chantier par la maîtrise d'œuvre.

DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés. Document réalisé à la fin du chantier, à l'attention du Maître d'ouvrage et de la maintenance.

DTU : Documents Techniques Unifiés : il s'agit des règles de l'art pour la réalisation des travaux.

DUEM : Dossier d'Utilisation, d'Exploitation et de Maintenance. Non décrit par la réglementation des marchés publics, c'est pourtant un document essentiel permettant d'indiquer à l'entreprise de maintenance ce qu'on attend d'elle. Le dossier de Mise au Point (**MAP**) fait partie du DUEM.

ECS : Eau Chaude Sanitaire

Esquisse : Phase initiale de la conception, avant l'APS. Souvent remplacé par la phase **Diagnostic** en rénovation.

ITI : Isolation Thermique par l'Intérieur

ITE : Isolation Thermique par l'Extérieur

OPR : Opérations Préalables à la Réception. Phase de suivi de la fin du chantier par la maîtrise d'œuvre, précédant et préparant la **Réception**.

PCI : pouvoir calorifique inférieur : contenu énergétique d'un combustible, sans prendre en compte la récupération de la chaleur de condensation de l'eau des fumées. Les rendements des chaudières sont exprimés en rendement sur PCI, ce qui explique des valeurs supérieures à 100% pour les chaudières à condensation.

PCS : pouvoir calorifique supérieur, qui prend en compte la chaleur latente de condensation de l'eau des fumées.

PTS : Pont Thermique Structurel, ou Intégré. Voir § 2.2.3.

Q4 / n50 : grandeurs caractérisant la perméabilité à l'air d'un bâtiment. Voir § 2.2.6.

RT2005 : Réglementation Thermique de 2005. Elle couvre d'une part la construction neuve (remplacée par la RT 2012) et la rénovation (toujours applicable).

RT2012 : Réglementation Thermique de 2012, applicable à la construction neuve.

STD : Simulation Thermique Dynamique. Outil très performant de modélisation des bâtiments. Voir § 0.

1 Objet

1.1 Contexte et enjeux

En 2006, au moment où est lancé le premier Appel à Projet de la Région Bourgogne, venaient d'avoir lieu les débats sur la loi d'orientation sur l'énergie de 2005. Le monde politique, les médias, parlent du changement climatique et de la fin des ressources fossiles bon marché, notamment du pic pétrolier. Les débats du Grenelle de l'environnement en 2007 ont prolongé et structuré cette prise de conscience.

Les Appels à Projets Bâtiment Basse Energie de la Région Bourgogne ont été initiés dans ce contexte comme une réponse concrète aux enjeux mondiaux de l'énergie. La conscience politique au niveau régional de ces enjeux a été le déclencheur de l'opération.

Près de 4,6 millions de tonnes-équivalent-pétrole ont été consommées en 2005 sur le territoire bourguignon¹, soit 2,8 tonnes-équivalent-pétrole par habitant et par an, ce qui est légèrement au-dessus de la moyenne nationale (2,6 tep/habitant). Les bâtiments résidentiels et tertiaires sont les premiers consommateurs d'énergie en Bourgogne avec 45% de la consommation totale. Ce niveau de consommation énergétique élevé contribue fortement aux émissions régionales de gaz à effet de serre évaluées à 3,5 millions de tonnes de CO₂, soit environ 20 % des émissions totales de la région.

L'urgence à agir dans le bâtiment est d'une actualité pressante d'autant que les consommations énergétiques dans ce secteur ont progressé de plus de 20% en moins de 20 ans en Bourgogne.

Le parc des bâtiments de la région est très important et représente 66 millions de m² pour le résidentiel et 24 millions de m² pour le tertiaire. La Bourgogne est la première région française de par l'ancienneté de son parc de logements, soit près de 38% construits avant 1949.²

D'un point de vue économique, le secteur du BTP représente (chiffres 2005²) un chiffre d'affaire de 4 milliards d'euros, ou encore 7% de la valeur ajoutée régionale générée. 7 500 à 9 000 logements sont mis en chantier chaque année, ainsi qu'entre 750 000 et 1,5 million de m² de bâtiments non résidentiels.

Compte tenu de ces indicateurs, le bâtiment est apparu naturellement comme le secteur où il faut agir en priorité, et également parce que c'est aussi là que l'on a le plus de moyens d'action.

Les Appels à Projets sont nés d'une volonté politique forte, portée au plus haut niveau de décision du Conseil Régional, puisque c'est le Président du Conseil Régional lui-même s'est personnellement impliqué dans le lancement de ces appels à projet.

Ces Appels à Projets sont exemplaires à plusieurs titres :

- le 1^{er} appel à projet à ce niveau de performance en France,
- un niveau de subvention attractif,
- un accompagnement technique pluridisciplinaire (c'est là une des grandes nouveautés),
- un nombre de lauréats de plus en plus important au fil des appels à projet.

¹ Source : <http://www.alterre-bourgogne.org/>

² Source : <http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/>

1.2 Présentation des Appels à Projets

1.2.1 Présentation des 3 Appels à Projets

❖ 2006 : les pionniers

Les objectifs ont été fixés par la région, comme un défi. On ne savait pas vraiment si c'était possible. Il y avait déjà l'exemple de la ZAC de Bonne à Grenoble, mais celle-ci était en cours de conception, pas encore réalisée.

La mission de l'AMO a complété le dispositif après le lancement de l'appel à projet.

Le nombre de lauréats de ce premier appel à projet a été de 7.

❖ 2007 : la montée en puissance de la dynamique

A la suite des 7 premières opérations et du succès rencontré tant auprès des Maîtres d'ouvrage que des Maîtres d'œuvre, l'envie d'aller plus loin et avec plus d'équipes est née, notamment grâce à un soutien et une volonté politiques très forts.

Cet Appel à Projets a été porté conjointement par le Conseil régional de Bourgogne et la délégation régionale Bourgogne de l'ADEME.

25 dossiers de candidature ont été soumis au premier jury, et 37 au second, soit 62 au total. Respectivement 13 et 27 projets ont été retenus, soit 40 au total.

❖ 2008 : le renforcement des objectifs

Suite au grand nombre et à la qualité des candidatures reçus lors de l'appel à projet de 2007, et au constat de la progression des équipes et de l'adhésion des Maîtres d'ouvrages, il a été décidé de renforcer les exigences. Les niveaux de performance visés ont été : BBC renforcé, Passif et Bâtiment à énergie positive. L'ambition technique a été ainsi portée au plus haut.

Malgré cette exigence technique, 61 dossiers de candidature ont été soumis au premier jury, et 90 au second, soit 151 au total, ce qui est remarquable ! Respectivement 54 et 59 projets ont été retenus, soit 113 au total.

Au total, les 3 appels à projets ont donc porté sur 160 projets, d'un niveau de performance allant de BBC à Bâtiment à énergie positive.

❖ Niveaux de performance et exigences QEB

	Appels à projet 2006 et 2007	Appel à projet 2008
Bâtiment neuf	BBC au sens de la RT 2005 Conception par Simulation Thermique Dynamique (STD). Objectif de confort d'été : moins de 40 heures au-dessus de 28°C.	Objectif selon outil de calcul physique des consommations tous usage (y compris électricité spécifique) Niveau 1 : « BBC renforcé » Niveau 2 : « Passif » Niveau 3 : Bâtiment à énergie positive <i>Tableau des exigences détaillées ci-dessous.</i> Objectif de confort d'été : moins de 40 heures au-dessus de 28°C calculé par Simulation Thermique Dynamique (STD).
Rénovation	Rénovation facteur 4 par obligation de moyens (voir aussi § 2.2.7) : <ul style="list-style-type: none"> - Isolation R=4,3 m².K/W des murs extérieurs et du plancher bas, - Isolation R=7,5 m².K/W de la toiture, - Menuiseries Triple vitrage si Isolation Thermique des murs par l'Intérieur (ITI), Double vitrage si Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE), - Ventilation double flux avec récupération de chaleur (efficacité > 70%), - Remplacement de chaudière (condensation), énergie renouvelable pour Chauffage et/ou ECS, régulation terminale performante, - Actions de Maîtrise de la demande d'électricité : <ul style="list-style-type: none"> • en logement fourniture de LBC, prise commandée du poste audio-visuel, • en logement collectif (communs) et tertiaire : luminaires à tubes T5 et ballast électronique, haut rendement optique, détection de présence, ascenseur performant, - Matériel hydro-économe : limiteurs de débit autorégulés, douchettes économes, limiteurs de pression à l'entrée des logements. <p>2 tests d'infiltrométrie obligatoires. Objectif non défini en 2006 et 2007, objectif indicatif de 1 vol/h en 2008 (3 vol/h obligatoire).</p>	
Suivi AMO	Réunions de conception, Analyse de la simulation thermique dynamique. Relecture des pièces écrites (DCE). Validation nécessaire avant de consulter les entreprises. Visites de chantier <i>Voir partie 1.2.3 pour plus de détails.</i>	
Exigences QEB	Absence de bois tropicaux, Réduction de l'usage du PVC, Incitation à l'utilisation de matériaux bio-sourcés, récupération des eaux pluviales et végétalisation des toitures encouragés (subvention complémentaire). Appel à projet 2008 : travail sur le contenu Energie Grise des bâtiments (énergie nécessaire à sa construction). Certaines équipes ont réalisé l'analyse de cycle de vie de leur bâtiment, comme testeur de l'outil e-Licco (version 1). Voir partie 2.4.2.	

On note que la particularité principale de l'appel à projet 2008 est d'introduire une méthode de calcul des consommations dite physique (et non conventionnelle comme le calcul réglementaire). Cette méthode est basée sur le besoin de chauffage calculé par simulation thermique dynamique, et sur des retours des campagnes de mesures d'Enertech. Les consommations sont exprimées en énergie primaire, en PCS pour le gaz, avec un facteur 3 pour l'électricité (plus proche de la valeur réelle comprise entre 3,23 et 3,28 selon les sources), 0,2 pour le bois (couvrant la plage du bois bûche au granulés, compris respectivement entre 0,1 et 0,2 environ). Ce calcul est décrit au § 2.3.8 et en annexe 2.

Les objectifs de l'appel à projet 2008 se déclinent en :

- un plafond de consommation de chauffage (calculé par STD et calcul physique),
- un plafond de besoin de chauffage (calculé par STD), ajouté comme garde-fou compte tenu du facteur énergie primaire favorable pour le bois,
- un plafond de consommation tous usages confondus, y compris l'électricité spécifique et les usages privés (électroménager, cuisson, informatique, ascenseurs, etc.). Cet objectif est rendu nécessaire par le constat que les seuls usages réglementaires ne représentent plus la majorité des usages de l'énergie dans le bâtiment. Il n'est donc plus pertinent de limiter la conception énergétique à ces seuls 5 usages.

Les exigences sont les suivantes :

Niveau 1 : bâtiment basse énergie (réservé aux logements)

<u>Plafond 1</u> : consommation de chauffage Calcul physique	<u>Plafond 1 bis</u> : besoin de chauffage Simulation dynamique	<u>Plafond intermédiaire</u> : consommation 5 postes Calcul Effinergie / RT 2005	<u>Plafond 2</u> : consommation tous usages confondus Calcul physique
$\leq 30 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SHAB / SUB}$ (coeff. 3 pour l'électricité et 0,2 pour le bois)	$\leq 30 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SHAB / SUB}$	$\leq 60 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SHON}$ (coeff. 2,58 pour l'électricité et 0,6 pour le bois)	$\leq 125 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SHAB / SUB}$ (coeff. 3 pour l'électricité et 0,2 pour le bois)

Niveau 2 : bâtiment très basse énergie

Type de bâtiment	<u>Plafond 1</u> : consommation de chauffage Calcul physique (coeff. 3 pour l'électricité et 0,2 pour le bois)	<u>Plafond 1 bis</u> : besoin de chauffage Simulation dynamique	<u>Plafond 2</u> : consommation tous usages confondus Calcul physique (coeff. 3 pour l'électricité et 0,2 pour le bois)
Logements	$\leq 20 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SHAB}$	$\leq 25 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SHAB}$	$\leq 100 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SHAB}$
Enseignement	$\leq 20 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 25 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 70 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$
Bureaux	$\leq 20 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 25 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 80 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$
Santé	$\leq 30 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 37 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 105 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$
Hôtels	$\leq 18 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 22 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 55 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$
Commerces	$\leq 20 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 25 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 90 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$

Niveau 3 : bâtiment à énergie positive

Type de bâtiment	<u>Plafond 1</u> : consommation de chauffage et d'ECS Calcul physique (coefficient 3 pour l'électricité et 0,2 pour le bois)	<u>Plafond 1 bis</u> : besoin de chauffage Simulation dynamique	<u>Plafond 2</u> : consommation tous usages confondus Calcul physique (coefficient 3 pour l'électricité et 0,2 pour le bois)
Logements	$\leq 30 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SHAB}$	$\leq 20 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SHAB}$	La consommation de l'ensemble des usages sans exception sera couverte par une source d'énergie sur le site même, dont la production sera supérieure d'au moins 10% aux besoins totaux.
Enseignement	$\leq 10 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 20 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	
Bureaux	$\leq 22 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 20 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	
Santé	$\leq 30 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 30 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	
Hôtels	$\leq 25 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 18 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	
Commerces	$\leq 15 \text{ kW.h}_{EP} / \text{m}^2_{SUB}$	$\leq 20 \text{ kW.h}_{\text{besoin}} / \text{m}^2_{SUB}$	

1.2.2 Des candidatures d'une grande qualité

Malgré le niveau de performance en avance sur son temps en 2006 et 2007, et le niveau de performance encore plus élevé demandé en 2008, la Région a reçu un nombre croissant de candidatures (respectivement 7, 62, puis 151) , présentant des projets d'une grande qualité énergétique et environnementale.

Statistiques sur les projets lauréats :

Lauréats	Nombre d'opérations suivies	160
	Surface	173 077 m ²
	Nombre de bâtiments	279
Abandons	Nombre d'opérations	51
	Surface	54 564 m ²
	Nombre de bâtiments	89
Opérations réalisées	Nombre d'opérations réalisées	109
	Surface	127 332 m ²
	<i>Dont construction neuve</i>	<i>86 077 m²</i>
	<i>Dont réhabilitation</i>	<i>41 255 m²</i>
	Nombre de bâtiments	190

Détail sur les projets réalisés (en nombre d'opérations) :

Appel à projet	Type de projet			Neuf ou Rénovation		
	Maison individuelle	Logement collectif	Tertiaire	Neuf	Mixte Neuf et Réhabilitation	Réhabilitation
2006	0	5	2	4	0	3
2007	9	8	14	23	2	6
2008	15	15	36	48	5	13
Total projets non abandonnés	24	28	52	75	7	22

Appel à projet	Niveau de performance					
	Rénovation Facteur 4	BBC	Niv. 1 BBC+	Niv. 2 Passif	Niv. 3 BEPOS	Autres (mixte)
2006	3	4	0	0	0	0
2007	6	23	0	0	2	0
2008	11	0	8	35	6	6
Total projets non abandonnés	20	27	8	35	8	6

Raisons des abandons :

Un certain nombre de projet lauréats ont été abandonnés ou se sont retirés de l'Appel à Projets. Leur nombre assez important nécessite d'explicitier les raisons qui ont conduit à cette décision :

- quelques rares projets se sont retirés à cause du niveau d'exigence qui leur semblait trop élevé, ou plus précisément à cause d'un coût total de l'opération trop important, dont un surcoût attribué à la performance jugé trop important (sur des bases parfois discutables). Mais ce n'est en tout état de cause qu'une petite partie des abandons,
- la raison principale a été la crise économique après 2008. Ces projets ont le plus souvent été complètement abandonnés, et pas seulement retirés de l'Appel à Projets. La raison de ces abandons est dans ces cas totalement extérieure à l'Appel à Projets lui-même.

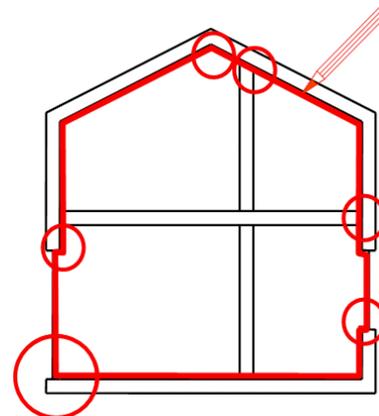
1.2.3 Présentation de la mission de l'AMO

La mission attribuée à Enertech est bien plus qu'une simple Assistance à Maître d'Ouvrage traditionnelle. Il ne s'agissait pas simplement de valider une grille d'objectifs, mais bien d'accompagner activement la conception et de suivre les opérations sur le terrain, afin que les bâtiments soient réellement à la hauteur des objectifs ambitieux fixés par le Conseil Régional.

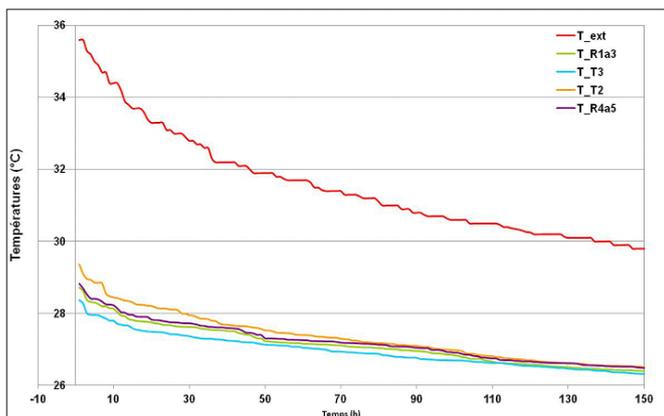
En cela également, cet appel à projet se distingue d'autres réalisations dans d'autres régions.

La mission qui a été confiée à l'AMO comportait donc :

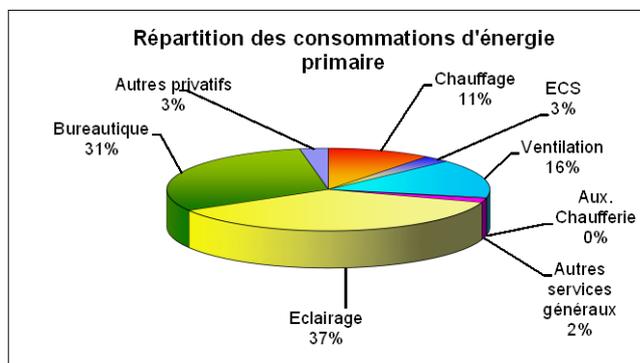
- des **réunions de conception** avec les équipes de Maîtrise d'œuvre et leurs Maîtres d'ouvrage. Ces réunions étaient l'occasion d'échanger et de partager les retours d'expérience. Tous les sujets nouveaux, notamment l'étanchéité à l'air, ont pu être abordés pour trouver ensemble les solutions techniques les plus adaptées. Ces échanges, la plupart du temps très fructueux, ont permis de faire évoluer les projets dans le sens d'une plus grande performance énergétique, environnementales, ainsi que vers plus de confort pour les utilisateurs (confort d'été notamment) ;



- l'**analyse de la simulation thermique dynamique** : ce mode de calcul était nouveau pour la majeure partie des bureaux d'études. C'est pourquoi la mission de l'AMO a inclus la réalisation d'un cahier des charges de simulation. La mission a consisté en partie en une assistance à la réalisation des simulations, puis l'accompagnement des équipes en vérifiant les hypothèses et les conclusions des simulations, conformément au cahier des charges. Cette mission a permis de corriger des oublis, inévitables lors de la prise en main d'un outil aussi complexe, et de contribuer à la recherche de solutions pour atteindre le niveau de performance recherché ainsi que le respect du critère de confort d'été ;



- pour l'appel à projet 2008, cette mission a été complétée par l'**analyse du calcul des consommations tous usages**, au stade APS/APD et de sa mise à jour au stade DCE (et le cas échéant en chantier) ;



- l'**analyse du Dossier de Consultation des Entreprises** a été la phase charnière de l'accompagnement par l'AMO. A l'issue des échanges en conception et de la simulation dynamiques, il s'agissait de vérifier que les plans et CCTP étaient conformes aux décisions actées et aux objectifs énergétiques et environnementaux. Le rapport de relecture, communiqué aux équipes, servait alors de document de suivi pour la levée des remarques, débouchant sur la validation du DCE. La procédure de l'appel à projet prévoit en effet que cette validation du DCE est nécessaire avant de consulter les entreprises ;

- en **phase chantier**, l'AMO a réalisé deux visites (une seule pour les maisons individuelles). La première portait sur l'enveloppe (vérification des isolants prévus au CCTP, suivi de l'étanchéité à l'air, etc.) et la seconde sur les systèmes (vérification de la conformité des équipements au CCTP ainsi que de la mise en œuvre) ;



- pour certaines opérations de l'appel à projet 2008, l'AMO a réalisé une troisième visite, nommée **visite de « mise au point »**. En effet, un certain nombre de retours ont montré que malgré la performance de la conception, de l'enveloppe et des équipements installés, les bâtiments ne fonctionnent pas toujours de façon optimale, voire qu'ils présentent des dysfonctionnements. C'est pourquoi la Région a proposé aux Maîtres d'ouvrage cette prestation supplémentaire, qui a permis d'identifier un certain nombre de dysfonctionnements liés au réglage et à la maintenance des installations techniques, et de proposer des solutions pour les résoudre.

La mission de l'AMO a été complétée par :

- le suivi de chantier et les réunions d'informations des entreprises sur l'étanchéité à l'air en début de chantier par Dominique Marie du Conseil Régional de Bourgogne ;
- les tests d'étanchéité à l'air financés par la Région (un par opération), réalisés principalement par Alsatech et Exp'Air 21 ;
- le suivi des consommations (instrumentation sur 2 ans) par le Cie Dupaquier ;
- la capitalisation et la valorisation des opérations par Bourgogne Bâtiment Durable. Cette mission a débouché notamment sur la création de fiches « opérations exemplaires », publiées notamment sur le site <http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/>

Enertech tient à souligner que la réalisation de sa mission n'aurait pas été possible sans la motivation, le soutien et l'appui du Conseil Régional de Bourgogne, et notamment de l'initiateur et pilote de l'appel à projet, Dominique Marie. Nous le remercions pour son apport à la dynamique des appels à projets, et sa présence active pendant la phase de conception et sur le terrain.

1.3 Objet du présent rapport

Les appels à projets de la région Bourgogne ont permis de mettre en place une dynamique inédite autour des bâtiments à très basse consommation. Inédite par le niveau de performance visé et atteint, ainsi que par le nombre de lauréats.

Au fil des échanges avec les équipes, de nombreux thèmes nouveaux ou peu connus ont pu être développés. On citera par exemple la question de l'étanchéité à l'air qui était jusqu'alors quasi inexistante en France. Ces thèmes ont été intégrés à la phase de conception, puis ont été concrétisés sur les chantiers, avec de nombreux retours d'expérience, et évalués (test à la porte soufflante dans le cas de l'étanchéité à l'air, et visites de chantier sur l'ensemble des autres thèmes).

Ces appels à projet ont constitué un **laboratoire**, où ont été développés des projets en avance sur leur temps. Ils ont été l'occasion de réaliser de nombreuses premières : 21 novembre 2007 : 1er grand colloque en France sur l'étanchéité à l'air – 370 personnes présentes malgré une grève SNCF, 4 vice-présidents présents !

- ✓ 600 personnes formées pendant 3 jours à la conception des bâtiments basse consommation (première en France) par Olivier Sidler,
- ✓ création des visites de « Mise au Point »,
- ✓ retours d'expérience : Campagnes de Mesure et Capitalisation.



Colloque du 21 nov. 2007 (photo : Conseil Régional de Bourgogne)

Fidèlement à l'esprit de ces Appels à Projets, qui a toujours été la **mutualisation des connaissances**, et le **droit à l'erreur** (seul moyen d'apprendre), le présent rapport a pour objectif de valoriser cette importante masse de connaissances et de retours d'expériences. L'objectif de ce qui suit n'est pas d'attribuer des « bons points » ou des « mauvais points », mais bien de **partager les retours d'expérience**. Nous présenterons en détail ce que nous avons appris collectivement dans le cadre de ces appels à projets, afin que tous les acteurs du bâtiment puissent en bénéficier.

Ce rapport est également l'occasion de dresser le bilan de l'ensemble des trois appels à projet : bilan environnemental et économique.

Ce document s'adresse :

- ✓ Aux Maîtres d'ouvrage souhaitant intégrer ces bonnes pratiques dans la programmation de leurs opérations et dans les missions qu'ils confient à leur maîtrise d'œuvre,
- ✓ Aux Maîtres d'œuvre, au titre de retour d'expérience que nous souhaitons partager et diffuser,
- ✓ Aux entreprises, notamment sur la phase chantier, afin de poursuivre l'évolution des métiers du bâtiment vers toujours plus de qualité et de performance.

2 La phase de conception

2.1 Une nouvelle dynamique d'équipe

2.1.1 Ce qu'implique la conception basse consommation

La conception d'un bâtiment basse consommation nécessite un **travail collaboratif** dès les premiers stades de la conception. La conception bioclimatique, le travail sur les ponts thermiques ou l'étanchéité à l'air, tous ces éléments sont déterminés très tôt dans la conception, et le tout implique un travail commun de l'Architecte, du Bureau d'étude Fluides, du Bureau d'étude Structure et de l'Economiste, pour placer d'emblée le projet sur les rails de la performance, dans une enveloppe budgétaire fixée.

Pour le dire de façon un peu abrupte, mais illustrant l'évolution depuis un mode de fonctionnement pas si ancien, le bureau d'étude n'est plus un simple exécutant qui fait passer ses réseaux dans le bâtiment déjà défini par l'architecte. Une relation de dialogue constructif est désormais nécessaire pour atteindre un niveau élevé de performance tout en maintenant un niveau de coût raisonnable. Et ce dialogue, pour être constructif, doit s'engager dès l'esquisse. Il exige une grande écoute et un grand respect mutuel des différentes composantes de la maîtrise d'œuvre.

NB : les propositions faites dans ce rapport sont déconnectées des contraintes administratives et du choix du type de marché (public, privé, PPP, conception-construction). Les rôles des intervenants et les différentes phases du projet sont basés sur les définitions de la loi MOP, et sont évidemment à adapter pour d'autres types de marchés.

2.1.2 L'implication du Maître d'ouvrage

Le Maître d'ouvrage est au centre de la dynamique d'un projet : c'est lui qui impulse la thématique de la basse consommation d'énergie.

Il est important que cette motivation et le niveau de performance visés soient **exprimés clairement dès le programme**. Il ne suffit pas d'annoncer des bonnes intentions : pour que l'équipe de maîtrise d'œuvre puisse se positionner de façon pertinente, les objectifs chiffrés ou les référentiels à respecter doivent être explicités dans le programme énergétique.

Du programme à la sélection de la maîtrise d'œuvre

Que doit contenir un « bon » programme ?

- ✓ Spécifier clairement les objectifs énergétiques : définir un ou des objectifs énergétiques, en précisant :
 - leur périmètre (chauffage, 5 usages réglementaires, tous usages confondus, avec ou sans production d'énergie renouvelable...),
 - leur unité (kW.h/m².an d'énergie Finale ou Primaire, en m² SHON, SHAB, surface Utile,...),
 - et leur mode de calcul (calcul réglementaire, Simulation Thermique Dynamique, calcul physique,...)
- et/ou renvoyer à un référentiel existant (Effinergie, PassivHaus,...).
- ✓ Référentiel environnemental applicable (HQE, cahier des charges QEB régional,...), usage des matériaux bio-sourcés, qualité des matériaux et de



l'air intérieur, calcul de l'énergie grise de la construction...

- ✓ Périmètre de la mission confiée à la maîtrise d'œuvre : base ou mission EXE complète ou partielle,
- ✓ Expliciter les moyens attendus pour la conception : Simulation Thermique Dynamique, (avec un cahier des charges, voir par exemple l'annexe 1), simulation d'éclairage naturel et/ou artificiel, calcul d'énergie grise / Analyse de Cycle de Vie (ACV),...
- ✓ Prévoir également un temps de conception suffisant pour que les études soient bien menées. C'est généralement du temps de gagné sur la phase de réalisation.
- ✓ Composition de l'équipe : nécessité ou non d'un bureau d'étude Qualité Environnementale,...

Le choix de la Maîtrise d'œuvre est loin d'être anodin. Tous ont un rôle à jouer. Sans être exhaustif, on peut citer :

- L'Architecte est le chef d'orchestre de toute construction. Il a un rôle central dans la conception performante puis dans le suivi de la réalisation.
- Le Bureau d'Etude Fluides a la charge d'imaginer les solutions pouvant mener à l'objectif de performance, et d'évaluer l'atteinte de ces objectifs. En phase chantier, sa présence est indispensable, et se prolonge pendant la phase de parfait achèvement (levée de réserves, mise au point).
- Le Bureau d'Etude QEB complète le cas échéant le travail de l'architecte et du bureau d'étude sur la qualité environnementale. Il réalise parfois la STD, les études FLJ, etc.
- L'Economiste doit pouvoir chiffrer justement des solutions aujourd'hui considérées comme « alternatives » (construction bois, matériaux bio-sourcés,...) dans le contexte local du projet.
- Le Bureau d'Etude Structure a également un rôle important dans la conception énergétique, en validant la faisabilité de solutions performantes pour éviter les ponts thermiques, etc.

Ainsi il semble réducteur de ne choisir une équipe que sur les références de l'architecte, ou une esquisse uniquement sur son image architecturale. C'est bien une équipe au complet qui est retenue, et les critères de choix devront intégrer la compétence de l'ensemble de l'équipe en bâtiments basse consommation. Pour juger de cette compétence, on peut s'appuyer :

- ✓ Sur les Références : il convient d'exiger un tableau de présentation des références explicitant les niveaux de performance atteints sur l'énergie, la qualité environnementale, ainsi que la labellisation éventuelle, voire les performances mesurées,
- ✓ Sur les Formations spécifique des Maîtres d'œuvre : formation HQE, Effinergie, etc.

Dans le cas d'un concours, on analysera bien évidemment la qualité de l'image architecturale, mais aussi la capacité de cette image à atteindre les performances visées, dans l'enveloppe budgétaire allouée. Il est notamment important d'assurer une certaine compacité, et la maîtrise des surfaces vitrées. Il est souvent intéressant pour les opérations d'une certaine complexité de demander une Simulation Thermique Dynamique dès la phase concours, pour valider le besoin de chauffage mais aussi et surtout le confort d'été.

Bien définir le besoin du Maître d'ouvrage

La programmation et les échanges avec la maîtrise d'œuvre doit aller encore plus loin : les usages précis du bâtiment, et les apports internes que cet usage génère doivent être explicités, sans quoi les calculs peuvent s'avérer très différents de la réalité (notamment en ce qui concerne le confort d'été).

Les échanges entre la maîtrise d'œuvre et le Maître d'ouvrage permettront ainsi de préciser les horaires d'occupation, le nombre d'occupant, la consigne de chauffage à prendre en compte, les apports internes (par exemple pour des bureaux la liste prévisionnelle des équipements de bureautique), etc. Ces éléments permettront à la maîtrise d'œuvre de mieux répondre au besoin du Maître d'ouvrage.

Il est par ailleurs souvent très pertinent que ces échanges puissent être à double sens : il peut être moins coûteux de travailler sur des usages d'électricité spécifique comme la bureautique pour améliorer les consommations d'un bâtiment, plutôt que s'acharner à gagner encore quelques kW.h/m² sur le chauffage, poste qui peut devenir largement minoritaire dans un bâtiment Passif ou à Energie Positive. Ainsi la maîtrise d'œuvre peut proposer au Maître d'ouvrage une évolution de son parc d'équipements, en allant vers des économies d'énergies importantes (de la simple gestion des veilles au remplacement progressif d'un parc informatique).

La question des honoraires de maîtrise d'œuvre

Comme on le verra dans la suite du rapport, les Maîtres d'œuvre doivent aborder des sujets nombreux et complexes :

- La conception de bâtiments performants ne laisse plus aucune place à « l'à peu près » en phase conception, que ce soit sur l'enveloppe (détails d'étanchéité à l'air ou de traitement des ponts thermiques, etc.) ou sur les systèmes (dimensionnement précis, optimisation des réseaux, etc.). C'est pourquoi il semble essentiel de confier la **mission d'Exécution** aux Maîtres d'œuvre.
- La conception de bâtiments à basse consommation implique un travail supplémentaire particulièrement pour le BET, qui doit être pris en compte dans le partage des honoraires. Il semble souhaitable que les Maîtres d'ouvrage aient un regard critique sur la **répartition des honoraires** lors de la sélection de son équipe de maîtrise d'œuvre. On a vu de nombreuses équipes dans lesquelles le niveau général des honoraires et leur partage s'établissaient sur des bases anciennes, sans tenir compte du travail beaucoup plus important à effectuer sur un projet performant. La conséquence était une absence du BET sur le chantier et des prestations insuffisantes faute de moyens.

Dans le cadre des appels à projets, les études ont été parfois limitées par les moyens financiers dont disposaient les équipes, et qui ne leur permettaient pas d'aller jusqu'au bout de la démarche, avec les outils de conception demandés (notamment la STD et le calcul des consommations tous usages). Ceci rejoint la nécessité de définir clairement dans le programme les moyens attendus pour la conception, et de vérifier que les propositions d'honoraires des équipes soient cohérentes avec ces demandes.

C'est pourquoi la sélection de l'équipe la moins-disante ne permet généralement pas d'aller vers la qualité à la fois architecturale, énergétique et environnementale.

Enfin, la complexité accrue de la conception doit également se répercuter sur les **délais d'étude**. La concertation au sein de l'équipe et le niveau de détail nécessaires pour la conception de bâtiments à basse consommation justifient de rallonger les délais d'étude. Il vaut souvent mieux décaler un planning pour avoir un rendu de qualité, que de maintenir un rythme trop rapide et risquer un retour en arrière et une perte de temps encore plus importante lors de la phase suivante si un aspect du projet conditionnant la performance a été négligé.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Programmation / Sélection de l'équipe de MOE			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Programmation		Définir clairement les objectifs énergétiques et environnementaux	Demander une STD au stade Concours
Mission de la MOE	MOE / BET sans suivi de chantier		Confier la mission EXE

2.1.3 L'équipe de maîtrise d'œuvre

La conception d'un bâtiment à basse consommation est avant tout un travail d'équipe. Les problématiques à résoudre sont transversales, et il est toujours préférable d'aborder ces sujets le plus en amont possible. Pour le dire en une phrase, **la performance se dessine et se décide dès les toutes premières phases de la conception.**

Certes, il est toujours possible de plaquer des systèmes performants sur un bâtiment conçu de façon traditionnelle, ou de mettre des isolants très performants sur un bâtiment peu compact, ou encore de climatiser un bâtiment trop vitré. Mais cela va à l'encontre de l'économie du projet, et génère une complexité qui est préjudiciable à la maintenance du bâtiment et généralement à sa performance réelle. En un mot, **ce sont les solutions les plus simples qui fonctionnent le mieux.** Et cette simplicité (apparente), est le fruit d'un travail collaboratif dès les premiers stades de la conception.

L'obligation du calcul du Bbio apparue dans le calcul RT 2012 dès le stade du Permis de Construire illustre bien cette évolution. Dès le PC, les lignes directrices du bâtiment (compacité, surfaces vitrées) sont figées. Il convient donc de s'assurer en amont qu'elles sont compatibles avec les objectifs.

Au-delà du calcul réglementaire, la Simulation Thermique Dynamique (STD) s'impose comme un outil de conception incontournable pour les bâtiments à basse consommation. Son utilisation optimale se situe aux premiers stades de la conception, idéalement dès l'esquisse. C'est un outil de conception et non de validation a posteriori.

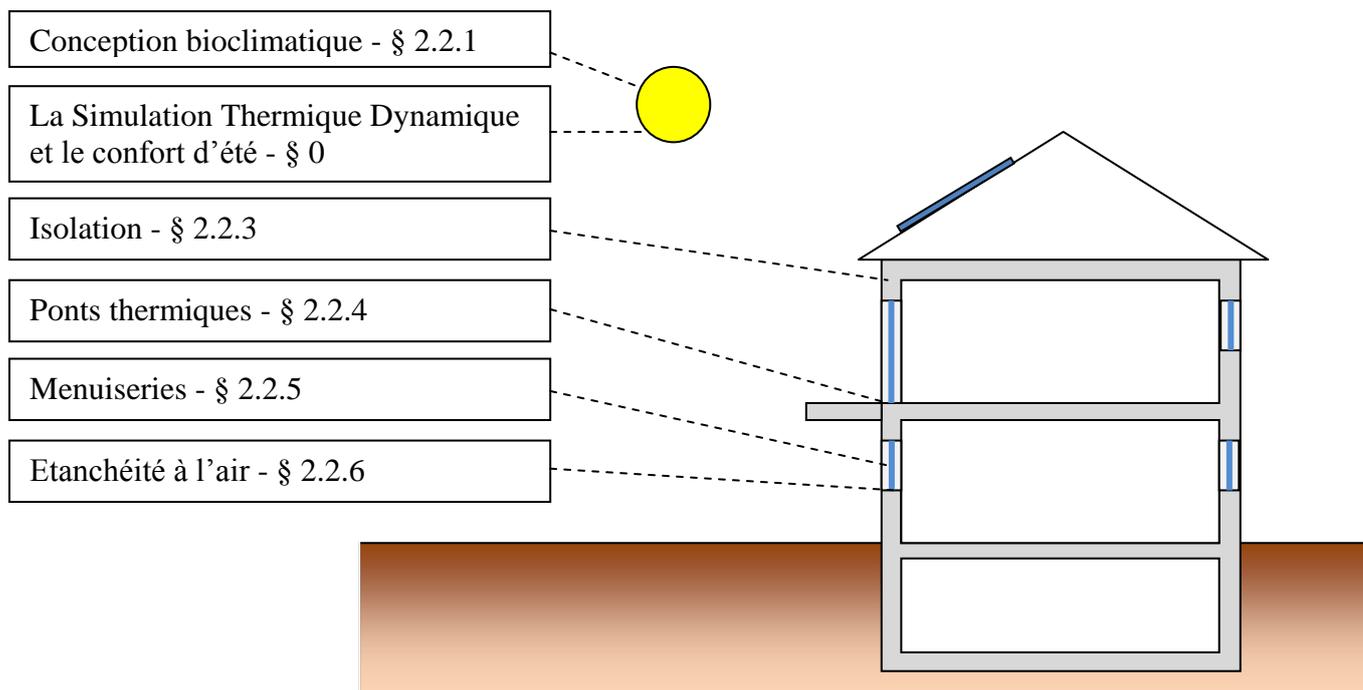
La STD très en amont permet d'objectiver les échanges au sein de la maîtrise d'œuvre : sa grande polyvalence permet de tester un large champ de variantes et d'éclairer le choix des Maîtres d'œuvres et de la maîtrise d'ouvrage, afin de respecter les objectifs de performance et les critères de confort d'été. Le chapitre 2.1.5 reviendra plus en détail sur cet outil.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Equipe de MOE			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Dynamique d'équipe	Plaquer la performance a posteriori sur un projet déjà figé	Travail collaboratif de toute l'équipe dès l'Esquisse	STD dès l'Esquisse

2.2 La conception de l'enveloppe

Présentation synthétique de la conception des bâtiments basse consommation, pour l'enveloppe :



NB : ce même schéma sera présenté et commenté de même pour la partie Systèmes en partie 2.3.

Ordres de grandeurs (à titre indicatif) des niveaux de performance :

Objectif	Rénovation facteur 4	BBC / RT 2012	Passif / Energie Positive
1. Conception Bioclimatique	Selon existant	Orientation sud fortement recommandée	Orientation Sud nécessaire, minimum de compacité, etc...
2. Simulation Thermique Dynamique	Non indispensable en logement, utile en tertiaire.	Recommandée	Nécessaire : confort d'été et besoin de chauffage (< 15 kW.h/m ²)
3. Isolation : Murs Toiture Plancher	U : 0,20 à 0,27 W/m ² .K	U : 0,15 à 0,25 W/m ² .K	U : 0,13 à 0,18 W/m ² .K
	U : 0,10 à 0,13 W/m ² .K	U : 0,13 à 0,15 W/m ² .K	U : 0,10 à 0,13 W/m ² .K
	U : 0,22 à 0,4 W/m ² .K	U : 0,15 à 0,25 W/m ² .K	U : 0,13 à 0,15 W/m ² .K
4. Ponts thermiques	ITE si possible, isolation périphérique plancher bas	Gardes fous de la RT 2012	ITE / construction bois
5. Menuiseries	Triple vitrage si ITI, double vitrage si ITE. Classement A4.	U _w de l'ordre de 1,5, classement A4 recommandé	U _w < 1,4, triple vitrage à haut facteur solaire selon orientation, classement A4 nécessaire.
6. Etanchéité à l'air	n50 de 1 à 3 vol/h selon l'existant	Q4 de 0,6 (maison) à 1,0 (logement collectif)	n50 de 0,6 vol/h

NB : Ces valeurs sont données à titre purement indicatif, et ne sont en aucun cas des règles de conception. Ces valeurs dépendent fortement de l'usage, du lieu, et de l'ensemble de la conception du bâtiment (dont la compacité et l'orientation).

Dans le cas de la rénovation, les obligations de moyens des Appels à Projets sont basées sur les travaux d'Enertech, dont la dernière mise à jour est le tableau des 10 solutions techniques de référence. Plus d'information au § 2.3.9 et sur www.enertech.fr.

2.2.1 La conception bio climatique

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Dès l'Esquisse	Architecte, avec le BET	Orientation, Compacité, Définition des volumes chauffé / chaud / étanche à l'air

❖ Définition

La conception bioclimatique est de façon générale l'intégration harmonieuse d'un bâtiment dans son environnement, en profitant des opportunités du lieu (ensoleillement, vents dominants...) et en se protégeant des agressions (pluie, froid) par la forme du bâtiment, son isolation, le positionnement des volumes tampon, etc.

On se concentrera ici sur 3 paramètres particulièrement importants pour la performance énergétique :

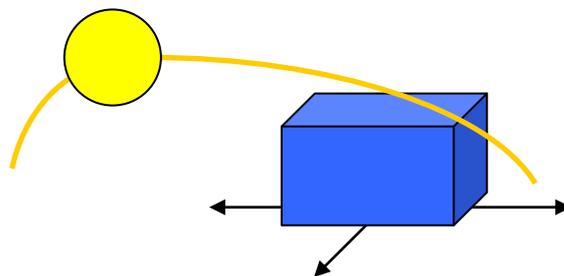
- ✓ l'**orientation**, qui est l'alignement des façades bâtiment par rapport au soleil et la répartition des surfaces vitrées sur les différentes façades ;
- ✓ la **compacité**, qui est le rapport des surfaces déperditives (surfaces séparant le volume chaud de l'extérieur) sur la surface ou le volume utile ; on recherchera à obtenir un maximum de surface utile pour un minimum de surface à isoler ;
- ✓ et la **définition des volumes chauffés** (pièces disposant d'émetteurs de chaleur), **chauds** (ne disposant pas d'émetteur de chaleur, mais inclus dans le volume isolé), et des **volumes étanches à l'air** (excluant par exemple les pièces comme les chaufferies ou locaux poubelle, qui disposent de ventilation naturelle).

A. Orientation

❖ Enjeu

L'orientation a un impact fondamental sur la performance du chauffage ainsi que sur le confort d'été.

Il est ainsi très difficile (certes possible, mais à quel prix...) de réaliser un bâtiment Passif dont les façades principales sont Est-Ouest. Il n'est pas possible de bénéficier pleinement des apports solaires, et le confort d'été passif est très difficile à assurer. On est alors obligés d'isoler très fortement, et d'envisager un système de rafraîchissement (puits canadien voire même climatisation active), ce qui impacte évidemment le budget de l'opération.



❖ Bonnes pratiques

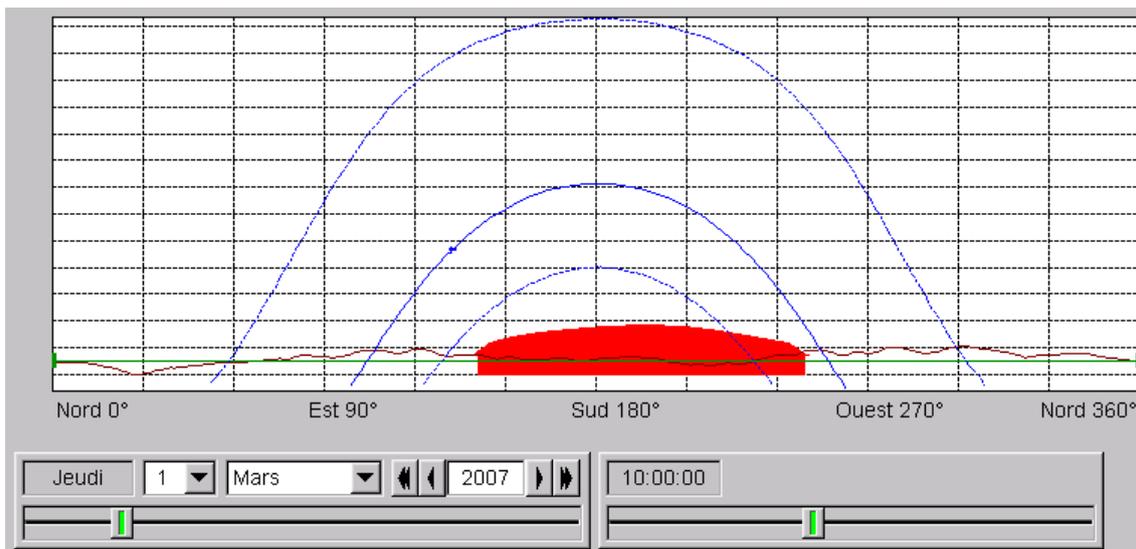
On recherchera à profiter au maximum du soleil en hiver :

- ✓ en concentrant les surfaces vitrées sur la façade sud,
- ✓ en positionnant le bâtiment sur le terrain de façon à minimiser les masques solaires (proches et lointains),

En parallèle, on recherchera des solutions pour se protéger du soleil en été :

- ✓ en restant raisonnable sur les surfaces vitrées totales (voir paragraphe suivant),
- ✓ en concevant des brise-soleil protégeant du soleil en été tout en le laissant passer en hiver,
- ✓ en utilisant la protection des végétaux à feuilles caduques,

✓ etc.



Exemple de masques solaires proches (en rouge) et lointains (ligne brune), position du soleil au jour et à l'heure fixés (courbe intermédiaire et point bleu). Calcul réalisé avec le logiciel Carnaval, de Sober software.

❖ *Points de vigilance*

Il est important de se souvenir que la pire orientation du point de vue du confort d'été est l'Ouest. En effet le soleil est alors rasant, et pénètre très facilement à travers les vitrages, et ce après que le logement a déjà subi la montée en température de toute la journée. Les pics de température intérieurs sont ainsi souvent constatés en fin de journée.

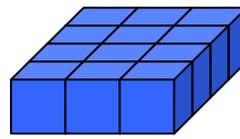
On notera également que les contraintes d'urbanisme peuvent s'opposer à une orientation optimale des bâtiments. Sans être exhaustif, on peut citer :

- ✗ une obligation l'aligner les façades (dans un lotissement...),
- ✗ un découpage des parcelles et des prospects ne permettant pas une orientation optimale (parcelle tout en longueur dans le sens Nord-Sud, imposant les façades principales Est et Ouest),
- ✗ ...

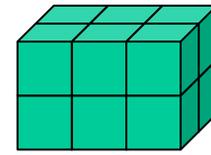
❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Orientation			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Neuf	Ouest (confort d'été)		Sud
Réhabilitation	Non concerné : l'orientation est subie la plupart du temps.		

B. Compacité



$$S \text{ parois} / S \text{ utile} = 3,2$$



$$S \text{ parois} / S \text{ utile} = 2,6$$

❖ *Enjeu*

La compacité a un double impact :

- ✗ sur le **coût de la construction** : une mauvaise compacité impose de construire plus de m^2 de murs pour une surface utile donnée. Le gros œuvre restant le poste le plus important dans l'économie d'un projet, on conçoit bien que la compacité est un enjeu essentiel de l'équilibre économique d'une opération ;
- ✗ sur la **performance** : pour atteindre le même niveau de performance, exprimée en kW.h par m^2 de surface utile, un bâtiment de mauvaise compacité va nécessiter une meilleure isolation (exprimée en W/K par m^2 de parois), une meilleure étanchéité à l'air intrinsèque (taux de fuite par m^2 de parois) ou encore des installations techniques plus performantes pour compenser une enveloppe moins performante. Il en découle des épaisseurs de parois plus importantes, plus de complexité, et de nouveau un coût plus élevé.
- ✓ A l'inverse, un bâtiment très compact peut permettre des économies en cascade : réseaux fluides plus courts, voire dans le cas des maisons individuelles au niveau Passif, possibilité de chauffer toute la maison avec un simple poêle à bois.

Il est important de noter que la notion de compacité ne concerne que le volume chauffé : on peut ainsi laisser libre cours à la création architecturale sur des volumes non chauffés (balcon, loggia, cage d'escalier et d'ascenseur, coursive, garage,...) accolés à un volume chauffé compact.

NB : il est clair que pour certains bâtiments, les contraintes et spécificités liées à l'usage (par exemple bâtiment à usage médical, l'accès à la lumière naturelle, etc.) peuvent nécessiter une « mauvaise compacité ». Atteindre une bonne performance est alors plus difficile et plus coûteux, mais reste possible, comme ont pu le montrer certaines opérations de l'Appel à Projet.

❖ *Méthodes de calcul*

S_p / V : appelé aussi coefficient de forme (CF), c'est le rapport surface des parois déperditives divisé par le volume chauffé.

S_p / S_u : surface de parois déperditives divisé par la surface habitable ou utile.

Ces deux définitions ont leur intérêt, selon qu'on considère que ce qui est utile pour la fonction du bâtiment est sa surface ou son volume.

A noter que la compacité dépend de la taille du projet. Ainsi une maison individuelle sera toujours moins compacte qu'un immeuble, même si les deux ont la même forme.

Par exemple pour un cube de côté 1m, $S_p/V = 6 \text{ m}^{-1}$, alors que le même cube de 2m de côté aura un facteur de forme $S_p/V = 3 \text{ m}^{-1}$. C'est pourtant toujours un cube !

Il est donc impossible de comparer des bâtiments de surfaces différentes.

Ce n'est pas un problème en conception, car sur une opération donnée, la surface utile est fixée par le programme. ***Le travail sur la compacité consiste alors à optimiser la compacité à surface utile constante.***

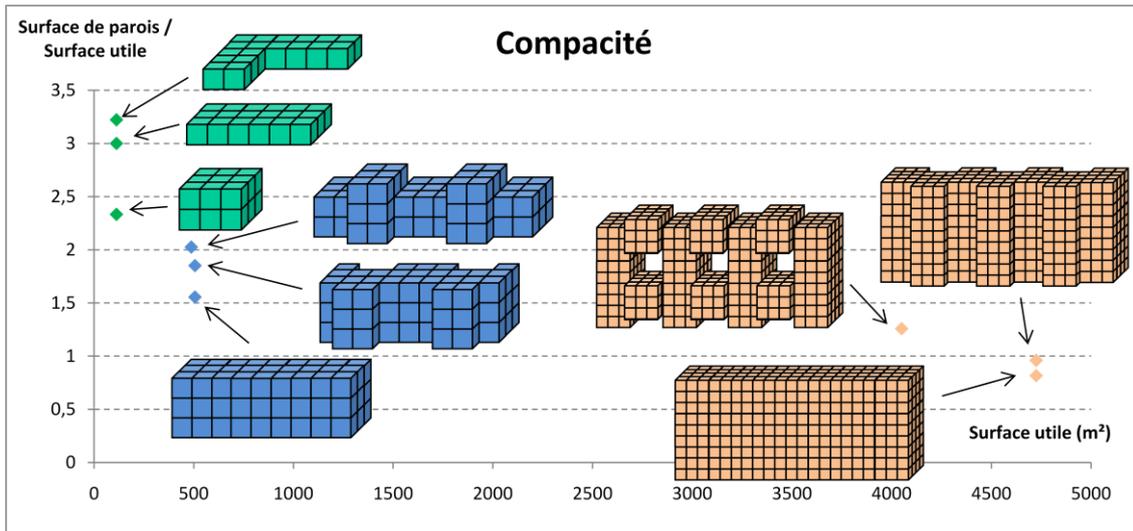


Illustration de l'évolution de la compacité en fonction de la taille et de la forme : chaque cube mesure de 2,5m de côté. On compare ainsi la compacité de différentes formes de maisons de 110 m² de surface utile (en vert), de différentes formes de petit collectif de 500 m² environ (en bleu) et de grands ensembles de 4000 à 4700 m² utiles (en orange)

❖ Bonnes pratiques

Exemples de réalisation dans le cadre des Appels à Projets.



*Opération peu compacte en raison de son usage,
SU de 3800 m²
 $Sp/V = 1,07 \text{ m}^{-1}$; $Sp/SU = 2,7$*



*Bâtiment très compact, SU de 4400 m²
 $Sp/V = 0,27 \text{ m}^{-1}$; $Sp/SU = 0,77$*



*Maison moyennement compacte, SHAB de 269 m²
 $Sp/V = 0,78 \text{ m}^{-1}$; $Sp/SU = 2,18$*



*Maison compacte, SHAB de 127 m²
 $Sp/V = 1,57 \text{ m}^{-1}$; $Sp/SHAB = 3,92$*

On note que la « bonne compacité » dépend de l'usage du bâtiment. Dans le cas de la première photo ci-dessus, il s'agit d'un institut médico-éducatif pour enfants. L'usage du bâtiment nécessitait l'absence d'étages et un rapport important aux espaces extérieurs. La compacité ne pouvait donc pas être « bonne » du point de vue du thermicien...

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Compacité			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Neuf		Rechercher la compacité maximale en fonction de l'usage et de la surface	
Réhabilitation	Non concerné dans le cas général.		Fermer des loggias pour améliorer la compacité

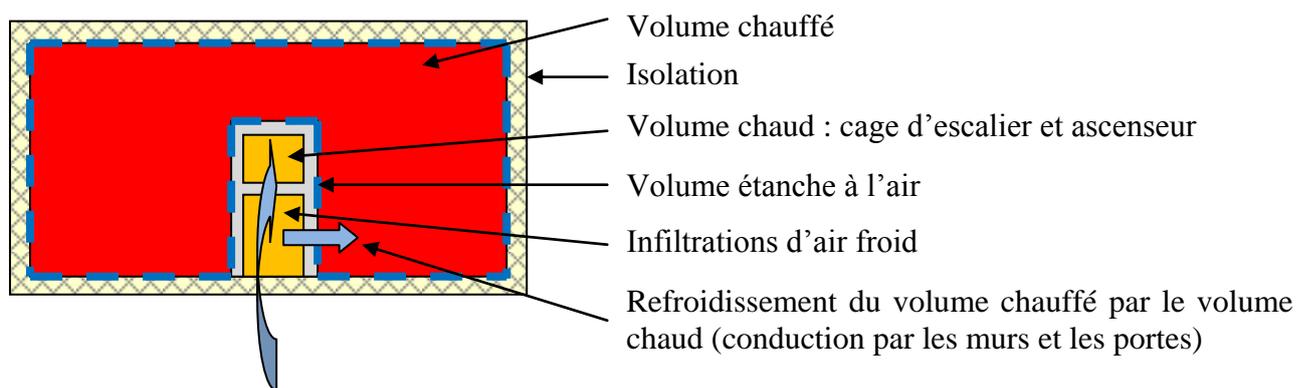
C. Définition du volume chauffé et étanche à l'air

❖ Enjeux

Dès les premières phases de la conception, il est très important d'avoir les idées claires sur les locaux qui sont ou non à chauffer, à isoler, et à rendre étanche à l'air. Le travail sur la compacité introduit au paragraphe précédent nécessite comme préalable d'avoir défini la stratégie d'isolation, et le cas échéant d'exclusion de volumes tampons.

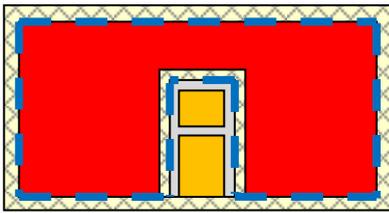
❖ Points de vigilance

Autant que possible, les volumes chaud et étanche à l'air doivent coïncider. Dans le cas contraire le volume chaud peut être refroidi par des circulations d'air dans la partie non étanche à l'air. Typiquement c'est le cas des cages d'ascenseur incluses dans le volume chaud :

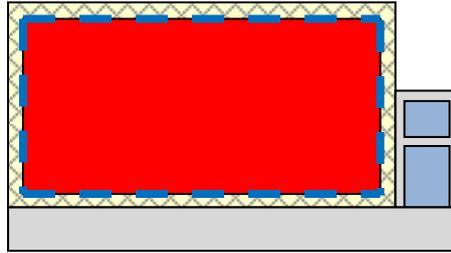


La cage d'ascenseur doit être ventilée par des ouvertures de taille importante. Il n'est donc pas possible que ce volume soit étanche à l'air (sauf mise en place d'un dispositif de volet commandé, type Bluekit). C'est pourquoi le volume étanche s'arrête généralement aux portes palières des logements collectifs. Pour autant, les ascenseurs et cages d'escalier sont souvent incluses dans le volume chaud. Le défaut de cette conception est alors que le volume chaud est refroidi par les infiltrations d'air dans la cage d'ascenseur.

La solution est donc de faire coïncider volume chaud et volume étanche : la cage d'ascenseur doit être exclue du volume chaud, soit en l'isolant, soit en la sortant du bâtiment (préférable pour la compacité).



Solution 1 : isoler entre cage d'ascenseur et logements



Solution 2 : sortir l'ascenseur du volume chaud, avec coursive



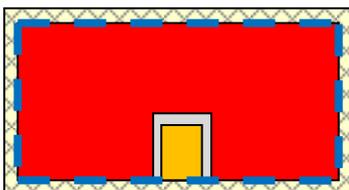
Exemple d'opération avec ascenseur hors volume chaud.

❖ *Bonnes pratiques*

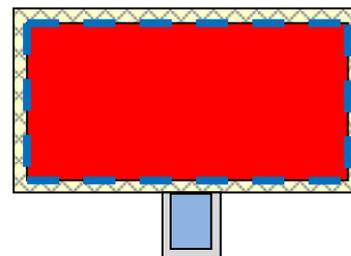
- ✓ Exclure les **ascenseurs** du volume chauffé,
- ✓ Exclure les **chaufferies** avec ventilation haute et basse du volume étanche. On peut les laisser dans le volume chaud dans la mesure où la température intérieure d'une chaufferie reste élevée même avec ces ventilations. Il faut en revanche bien assurer l'étanchéité à l'air entre la chaufferie et le volume chauffé.

A noter que ces ventilations haute et basse ne sont pas nécessaires pour des petites puissances dans le cas de générateurs étanches (notamment à ventouse),

- ✓ Ne pas oublier d'isoler les **sous-faces d'escalier** sur sous-sol non chauffé, ainsi que les parois et portes correspondantes,
- ✓ Utiliser les **volumes tampons** : la stratégie d'isolation sur ces volumes doit être claire : le volume tampon peut être inclus dans le volume chaud et étanche à l'air si cela améliore la compacité, ou au contraire exclu du volume chaud (volume tampon froid).



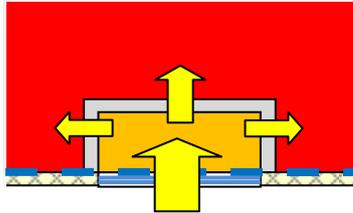
Volume tampon chaud



Volume tampon froid

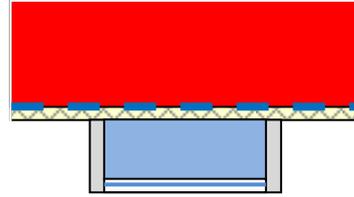
- ✓ Le cas particulier des serres, ou **vérandas bioclimatiques** mérite d'être également bien défini : on privilégiera une stratégie de serre chaude si l'on dispose d'une orientation sud, et d'un très bon contact avec le volume chauffé (3 murs non isolés, menuiseries non isolantes). On dispose alors d'une véritable chaudière solaire : l'orientation permet de bien capter la chaleur du soleil, et les surfaces de contact permettent de diffuser facilement la chaleur vers le volume chauffé.

A contrario, une véranda mal orientée et en débord sera de préférence une véranda « froide ». Le mur et les menuiseries entre cette véranda et le volume chauffé seront alors thermiquement performantes.



Serre chaude, orientée au Sud

Vitrage isolant à l'extérieur, pas d'isolation entre la serre et l'intérieur



Serre froide, mal orientée et/ou en débord

Vitrage extérieur non isolant, isolation entre la serre et l'intérieur

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Définition des volumes			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Neuf	Oubli d'isolation du volume chaud (attention aux sous-faces des escaliers...)	Étanchéité à l'air entre chaufferie ventilée et volume chauffé	Ascenseur hors volume chauffé ; serre chaude au Sud
Réhabilitation			

❖ Pour aller plus loin

- *La conception Bioclimatique, Samuel Courgey et Jean Pierre Oliva, Ed. Terre vivante.*

2.2.2 La Simulation Thermique Dynamique et le confort d'été

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Esq. à APD	BET + Architecte	A réaliser dès l'esquisse. Valider impérativement le confort d'été avant le dépôt du PC

❖ Définition

La **Simulation Thermique Dynamique**, ou STD, est une modélisation très précise d'un bâtiment, prenant en compte un très grand nombre de paramètres : définition du bâtiment avec son isolation, son inertie, le facteur solaire des vitrages, le fichier météo avec les températures et l'ensoleillement, les masques solaires proches ou lointains, les apports internes basé sur des scénarii d'utilisation (à définir par le Maître d'ouvrage, cf § 2.1.2), les scénarii d'utilisation des installations techniques, etc. Cet outil permet de calculer les besoins de chauffage en hiver, et les températures en été, pour vérifier le confort.

C'est l'outil le plus précis à la disposition des bureaux d'étude pour modéliser un bâtiment. C'est également un outil complexe, qui demande du travail pour être utilisé correctement.

Comme tout calcul, la précision des résultats dépend de l'exactitude des hypothèses. C'est pourquoi il est fortement recommandé de tester la robustesse des résultats à des variantes sur ces hypothèses.

❖ Enjeux

Dès les premiers Appels à Projets, la Région Bourgogne a jugé nécessaire de rendre obligatoire la simulation thermique dynamique pour toutes les opérations neuves.

C'est en effet le seul outil qui permet de **valider le confort d'été**, qui est un des enjeux majeurs des bâtiments à basse consommation d'énergie. En effet, il faut savoir qu'un bâtiment très isolé présente un risque important de surchauffes en été, le rendant inconfortable. Ce risque doit être étudié, maîtrisé, et des solutions peuvent être apportées. Seule la STD permet d'effectuer ce travail.

C'est également un outil de conception qui prend un rôle central, puisqu'il permet de rendre objectifs les échanges entre architecte et bureau d'étude. On souhaite modifier la compacité ? Modifier les surfaces vitrées ? Déterminer les performances des parois ? La STD permet d'évaluer l'impact de toutes ces variantes, et est le **« juge de paix » qui permet de décider** en connaissance de cause.

C'est pourquoi la STD doit être utilisée **le plus tôt possible dans la conception**, comme outil d'aide à la décision, et non comme un outil de validation. Dès l'esquisse, des principes peuvent être figés et rendre impossible (ou très coûteuse) la performance énergétique et le confort d'été souhaités.

Pourquoi ne pas se contenter du calcul réglementaire ?

Les méthodes de calcul Th-CE (RT2005) et Th-BCE (RT2012) sont par définition des **méthodes de calcul conventionnelles**. Ceci signifie que les scénarii d'utilisation des bâtiments, les apports internes, etc. sont figés. Ceci présente l'intérêt de comparer les bâtiments entre eux de façon équitable.

Mais ceci ne reflète pas la vraie vie des bâtiments avec leurs usagers.

Lorsque l'on vise un niveau de performance élevé, le Maître d'ouvrage souhaite disposer d'une **évaluation des consommations d'énergie prévisionnelles**. Or le calcul réglementaire ne permet pas de calculer ces consommations de façon réaliste. On constate en particulier un écart parfois très important sur les consommations de chauffage. Le calcul par STD est plus fiable (sous réserve d'exactitude des données d'entrées), et permet une estimation plus proche de la réalité.

De plus, le calcul réglementaire ne porte que sur 5 usages : chauffage, rafraîchissement, eau chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires. Il ne prend pas en compte les autres consommations d'énergie, comme l'électroménager, la cuisson, les usages bureautiques, etc. Or dans des bâtiments Passifs ou à Energie Positive, ces usages deviennent prépondérants.

C'est pourquoi, dans le cadre de l'Appel à Projets 2008, l'AMO a développé une **méthode de calcul « physique » des consommations tous usages**, basé sur la STD pour le besoin de chauffage, et sur des campagnes de mesures sur les autres usages. C'est ce calcul qui a été pris comme référence pour le respect des objectifs de performance de l'appel à projets 2008 (cf § 1.2.1 pour les objectifs, § 0 sur le calcul réglementaire, et § 2.3.8 sur l'outil de calcul des consommations tous usages).

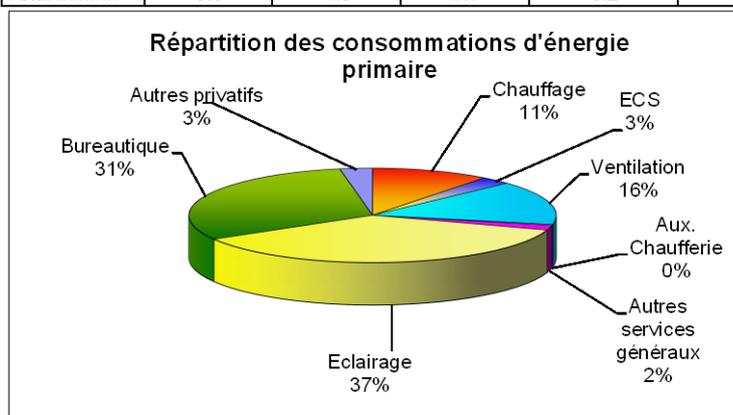
Bilan des consommations en kW.h/m² SU.an d'énergie primaire

Bâtiment tertiaire

Rappel : coefficient d'énergie primaire de l'électricité :

3

Bâtiment	Chauffage	ECS	Services Généraux			Eclairage	Bureautique	Autres privatifs	Total Général
			Ventilation	Chaufferie	Autres				
Total kWh/m ²	5.3	1.3	7.7	0.2	0.8	18.5	15.6	1.5	50.9



Respect des objectifs de l'appel à projet

Niveau 1	Chauffage	Besoin Ch.	Tous usages
Objectif	30	30	125
Calcul	5.3	17.5	50.9

Niveau 2	Chauffage	Besoin Ch.	Tous usages
Objectif	20	25	80
Calcul	5.3	17.5	50.9

Niveau 3	Ch + ECS	Besoin Ch.	Couverture EnR
Objectif	22	20	56.0
Calcul	6.6	17.5	60.0

Exemple de calcul des consommations tous usages pour un bâtiment de bureaux à énergie positive.

Enfin, la STD est également un outil plus précis que le calcul réglementaire pour la **vérification du confort d'été**. L'indicateur donné par le calcul réglementaire (Tic : température intérieure conventionnelle maximale en été) ne donne pas une vision complète de la notion de confort. Dans le cahier des charges de l'Appel à Projet, l'objectif était exprimé en nombre d'heures d'inconfort à ne pas dépasser. Le critère à respecter est de moins de 40h au dessus de 28°C. Il était également demandé de faire apparaître dans le rapport une **courbe de fréquence cumulée des températures estivales**, permettant de juger de la sensibilité du résultat.

❖ Points de vigilance

Comme tous les calculs, la qualité de la STD est directement liée à la qualité des données d'entrées utilisée. Une simulation réalisée avec des hypothèses fausses ne peut conduire qu'à des résultats faux. Ainsi une part importante de la mission de l'AMO énergie dans le cadre des Appels à Projets a été de vérifier la cohérence de ces données d'entrée et les ordres de grandeur des résultats. Une telle **analyse critique des données d'entrée et des résultats** est absolument nécessaire, en externe (AMO) pour les BE qui ne maîtrisent pas encore cet outil, et même pour les utilisateurs expérimentés un autocontrôle est indispensable.

Cet autocontrôle peut notamment passer par des **études variationnelles** (que se passe-t-il si j'augmente la consigne de chauffage ? si je supprime l'échangeur de la ventilation double flux ? si je fais varier le niveau d'étanchéité à l'air ?). L'utilisateur expérimenté de la STD connaît les ordres de grandeur et pourra en vérifier la cohérence. De façon générale, il est nécessaire de garder un œil critique sur les résultats et de contrôler les ordres de grandeur.

Il est important de souligner, comme résultat récurrent, que **+1°C de consigne de chauffage provoque généralement une augmentation du besoin de chauffage de +15% à +20% pour des bâtiments au niveau BBC, et de +18% à +25% pour des bâtiments Passifs.**

C'est pourquoi il est important de définir en accord avec le Maître d'ouvrage la **température de consigne réaliste** à prendre en compte dans les calculs. On rappelle que la réglementation (Code de la Construction) impose en principe une consigne de 19°C. Cependant, si le Maître d'ouvrage n'a pas l'intention de respecter cette valeur, il convient de l'informer des conséquences de ce choix, et de concevoir le niveau d'isolation en conséquence (plus d'isolation pour la même performance). On verra vite que sans un minimum de sobriété on arrive vite à beaucoup de complexité et des coûts élevés. Il faut également rappeler que dans les bâtiments performants, l'effet de paroi froide et les courants d'air par infiltration ont disparu, et que **le confort à 19°C peut être meilleur que celui à 22°C dans une passoire thermique**. Tout ceci doit faire l'objet d'échanges entre la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage, en connaissance de cause.

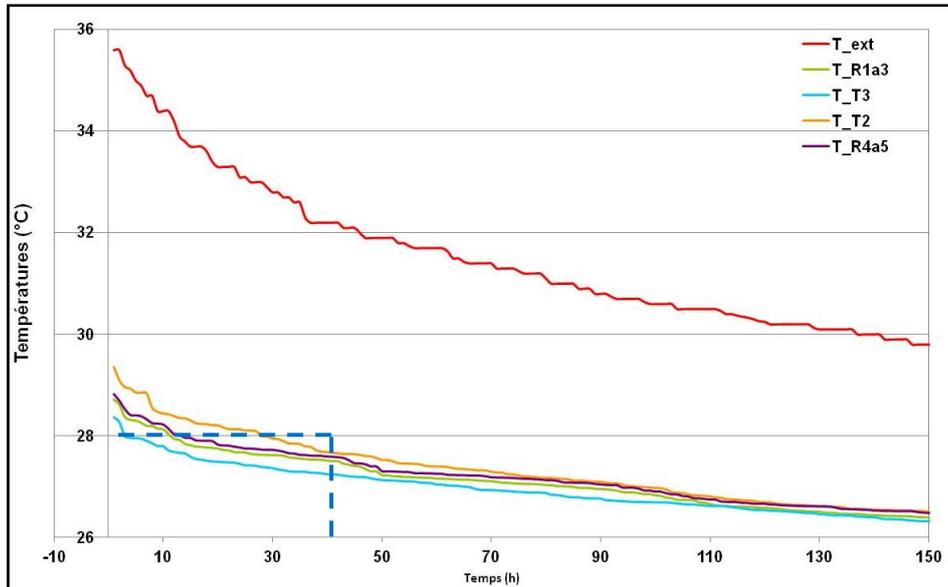
Voir en Annexe 1 le **cahier des charges de STD des Appels à Projets**. Ce document définit les hypothèses types utilisées dans les Appels à Projets, et les études variationnelles nécessaires pour vérifier la cohérence des résultats. En particulier les fichiers météo ont été imposés par soucis d'homogénéité des résultats. Ils sont basés sur les données Météonorm disponibles, avec une correction de +3°C en été pour tenir compte du risque accru de canicules (comme celle de 2003) dans les années à venir.

D'autres corrections peuvent être apportées à ces fichiers météo : correction d'altitude, effet d'îlot de chaleur urbain...

Autres points de vigilance

Ecueils fréquemment rencontrés lors des relectures de STD :

- ✓ Prendre en compte les **Ponts Thermiques Structurels**, ou intégrés (cf § 2.2.3) dans le calcul de la performance des parois ;
- ✓ Etablir soigneusement le **catalogue des ponts thermiques**, en anticipant les difficultés techniques avec le BE structure. Au niveau de performance visé, les ponts thermiques jouent un rôle très important (souvent près d'un tiers des déperditions par les parois). Aucun ne peut être négligé, pas même les ponts thermiques autour des menuiseries (faible valeur Psi, mais linéaire très important). A l'avancement du projet, vérifier la cohérence avec les carnets de détails, et tester les modifications le cas échéant.
- ✓ Prendre en compte un **taux d'occultation maximal réaliste**. Les utilisateurs n'accepteront pas de vivre en occultant complètement toutes les menuiseries ! Ce taux maximal est fixé à 70% dans le cahier des charges de STD des Appels à Projets.
- ✓ Pour la présentation des résultats concernant le confort d'été, le cahier des charges de STD demande de tracer un **graphique de fréquence cumulée des températures** :



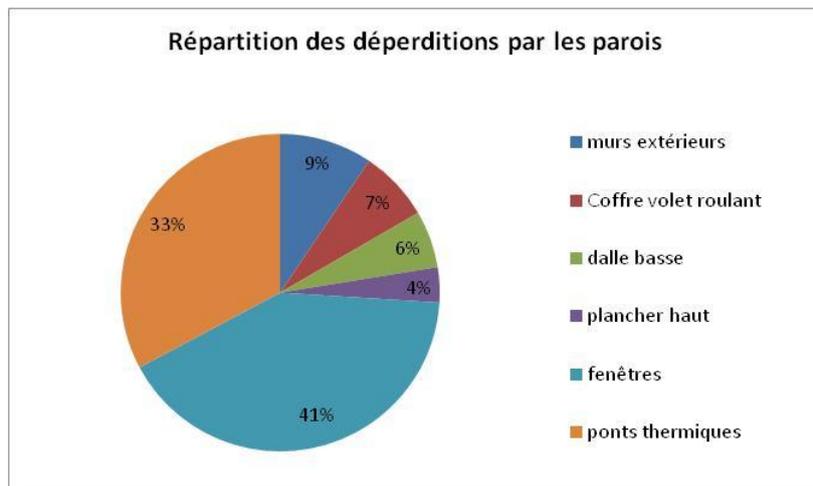
Exemple de graphique de fréquences cumulées : on voit ici par exemple que le bâtiment est plus confortable que l'extérieur, que la zone « T2 » est la plus défavorisée, et que la zone T2 cumule 30 h au-dessus de 28°C, soit moins de 40h, donc le critère est respecté.

- ✓ Vérifier la cohérence entre le scénario d'occupation et le **scénario de ventilation**, selon les débits réglementaire (25 m³/h par personne dans les bureaux selon le code du travail, 18 m³/h par personne dans les locaux relevant du Règlement sanitaire départemental type (RSDT), débits de l'arrêté de 1982 pour les logements...);
- ✓ La **prise en compte réaliste de la ventilation hygroréglable** est assez différente de celle du calcul réglementaire. En interprétant finement des résultats de mesure en occupation réelle, l'économie par rapport au débit en ventilation simple flux autoréglable est de l'ordre de 18 à 35% pour une mise en œuvre et un fonctionnement optimal, et non de 33 à 50% comme indiqué dans les avis technique (sur la base des scénarii d'occupation conventionnels);
- ✓ Afin de tenir compte de l'encrassement des échangeurs de chaleur, et de son dégivrage, le cahier des charges de STD recommande de plafonner à 70% l'**efficacité de récupération de chaleur de la ventilation double flux**;

❖ Bonnes pratiques

Réflexions concernant l'enveloppe

- * Dans les projets, **l'isolation du plancher bas** est souvent négligée. Pourtant, il apparaît qu'il est intéressant économiquement d'isoler le plancher bas aussi fortement que les murs : ceci évite d'avoir à renforcer sans fin la performance des murs.
- ✓ De façon générale, pour établir la priorité des parois à renforcer, il est recommandé de calculer la répartition des déperditions par les parois.



Exemple de répartition des déperditions par les parois (hors AAP) : dans cet exemple il ne sert plus à rien de renforcer l'isolation des murs : il faut travailler sur les ponts thermiques, sur les menuiseries, et sur... l'isolation des coffres de volets roulants.

- ✓ Globalement, il est recommandé de **prendre des marges sur la performance** des parois ou des menuiseries. En effet, les contraintes du chantier vont toujours dans le sens de dégrader la performance. Mais attention, marges ne veut pas dire surdimensionnement des équipements (voir § 2.3.3), on parle bien ici de marge par rapport à l'objectif de performance.

Pistes pour assurer le confort d'été

Synthèse des bonnes pratiques – Confort d'été			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Inertie	Pas d'inertie (planchers légers)	Dalles	Faux plafond « aéré » (voir ci-dessous)
Surfaces de menuiseries vitrées	> 25% de ratio Sv / SHAB ou SU	18 à 20% de ratio Sv / SHAB ou SU	16,6 à 18% de ratio Sv / SHAB ou SU
Occultations	Aucune	A toutes les menuiseries (pouvant assurer 70% d'occultation)	
Surventilation	Menuiseries uniquement fixes	Ouvrants oscillo-battant permettant de surventiler sans craindre la pluie	Logements traversants. Ouvrants dédiés, protégés de la pluie et de l'intrusion par un brise-soleil fixe...
Apports internes		Gestion des veilles Eclairage basse consommation	Réflexion sur les usages (ordinateurs portables...)

Précisions sur le tableau ci-dessus :

- ✓ Concernant l'inertie :

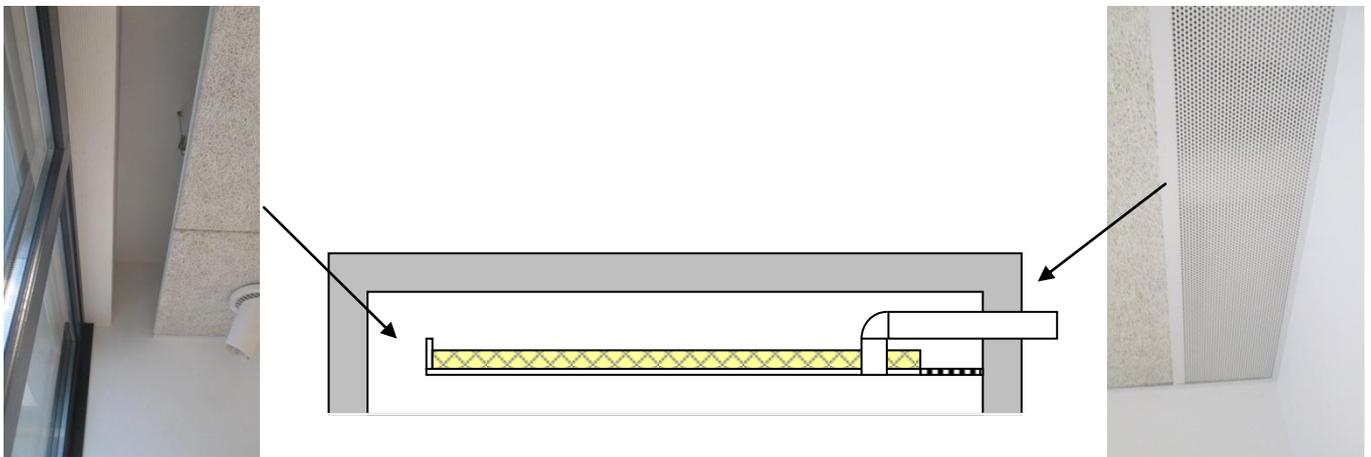
- **La contribution des dalles à l'inertie d'un bâtiment est bien plus importante que celle des murs.** En effet, il ne suffit pas d'apporter de la masse, il faut aussi que l'échange entre l'air et cette masse se fasse assez rapidement. Pour cela, il faut une importante surface d'échange, ce que procurent les dalles, bien plus que les murs extérieurs dont seule la face intérieure est en contact avec l'ambiance. C'est pourquoi il est tout à fait possible de réaliser des bâtiments confortables avec une double isolation ITI + ITE, ou avec des murs à ossature bois, tant que les dalles apportent de l'inertie.
- Il est important de noter que la présence d'un isolant sous chape réduit fortement l'inertie mobilisable : en pratique seule la chape contribue à l'inertie de la pièce située au-dessus de ce plancher.

NB : Dans le cas d'un plancher chauffant, ce défaut peut être plus que compensé par la possibilité de réaliser un géocooling (rafraîchissement gratuit par circulation de l'eau issue de forages géothermique dans le plancher).

- On entend souvent dire que la **végétalisation des toitures** contribue au confort d'été. Ceci est vrai dans une certaine mesure, compte tenu du rafraîchissement par l'évaporation d'eau en été (notamment pour la végétalisation extensive). Mais **l'impact en reste faible**, car une isolation importante sépare l'inertie de cette végétalisation de l'air intérieur du bâtiment.

NB : Ceci n'ôte rien à l'intérêt de la végétalisation pour l'intégration architecturale, la gestion des eaux pluviales et la biodiversité en milieu urbain, ainsi que l'atténuation des îlots de chaleur.

- On appelle **faux plafond « aéré »** un faux plafond qui est arrêté avant les murs périphériques, permettant ainsi à l'air de circuler entre la pièce et le volume du faux plafond. En effet, dans le cas contraire le faux plafond isole la pièce de la dalle, ce qui rend l'inertie de la dalle inutile pour cette pièce.

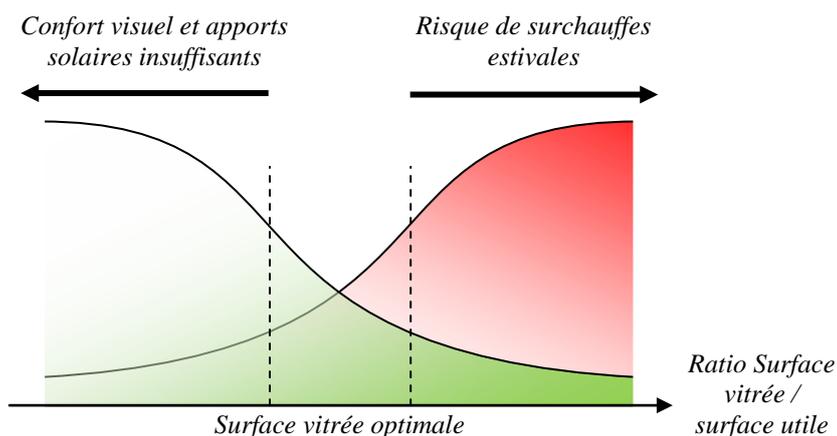


Exemple de faux plafond « aéré ». Noter que le faux plafond atteint le mur côté couloir pour masquer les réseaux techniques (ventilation...). Noter également la petite joue du côté où le faux plafond s'arrête, pour éviter que de la poussière tombe du faux plafond dans la salle.

✓ Concernant les surfaces de menuiseries vitrées :

- Les surfaces vitrées font l'objet d'une **optimisation multicritère**, comme l'illustre le schéma ci-dessous :

Ci-contre : Illustration de la recherche d'un optimum de surface vitrée



- La surface vitrée est exprimée en ratio de **surface de menuiseries en tableaux (Sv)** rapportée à la surface habitable (SHAB) ou utile (SU). **L'optimum entre confort d'été et confort visuel se situe autour de 18%.**
- **Attention aux menuiseries en toitures**, qui ont un impact énorme sur le confort d'été. Limiter leur usage autant que possible, privilégier l'orientation au Nord, et prévoir impérativement une occultation extérieure (volet roulant...).
- De même, bien prendre en compte dans les simulations les **ouvrants de désenfumages** ou autres source d'éclairage naturel en toiture, qui peuvent avoir un impact très important. Il existe des occultations fixes adaptées (photo ci-dessous). Privilégier l'éclairage naturel par menuiserie verticale orientée au Nord.



Occultation fixe pour exutoire de désenfumage

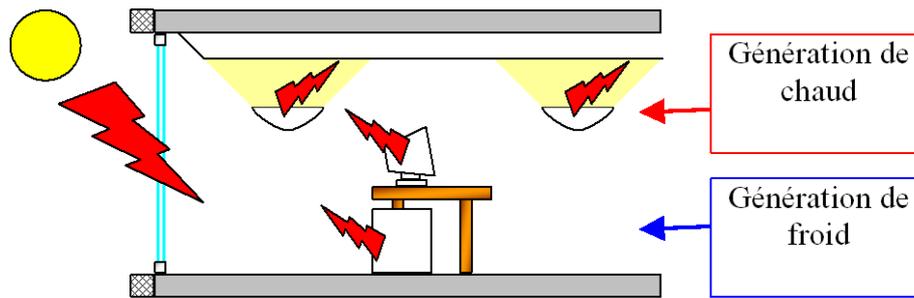


Eclairage naturel par menuiseries verticales orientées au Nord

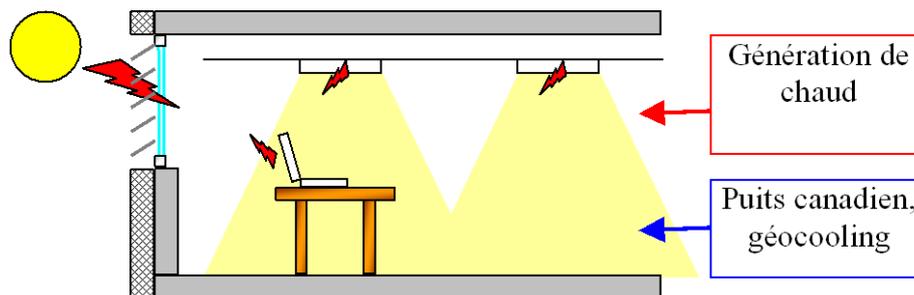
✓ Concernant les apports internes :

- **Le confort d'été a été assuré de façon purement passive sur la quasi-totalité des opérations des appels à projet.** Il est important de le signaler, car ceci génère une **économie**

et une simplification des installations techniques (pas de génération ni de distribution de froid).



Conception traditionnelle : pas d'optimisation des apports internes ni des apports solaires : une climatisation active est nécessaire



Conception passive du confort d'été : l'inertie du bâtiment, la maîtrise des surfaces vitrées, les occultations et la surventilation, éventuellement renforcées par un puits canadien ou un système de géocooling (rafraîchissement gratuit par des sondes géothermiques) permettent d'éviter la climatisation.

La nécessité d'un rapport « lisible »

Un rapport de STD doit être un rapport technique, qui précise les hypothèses d'entrée et les résultats. Mais c'est surtout un rapport de conception, qui s'adresse à l'Architecte et au Maître d'ouvrage. **Il est ainsi indispensable que le rapport soit rédigé de façon compréhensible par un non-spécialiste, et que les conclusions soient résumées en termes non techniques à l'attention du Maître d'ouvrage.**

En retour, il semble important que les Maîtres d'ouvrage prennent le temps de consulter ce document, et d'en vérifier les hypothèses liées au programme et à l'utilisation future du bâtiment notamment en tertiaire (nombre d'occupants, horaires, mode d'utilisation, types d'apports internes...). Certains résultats, comme par exemple l'impact de la température de consigne sur le besoin de chauffage, ou l'impact des apports internes sur le confort d'été sont des conclusions qui s'adressent directement aux futurs utilisateurs.

❖ *Pour aller plus loin*

- Fiche technique sur le confort d'été réalisée par Enertech pour la MAF (Mutuelle des Architectes Français), disponible sur le site www.enertech.fr

2.2.3 Performance des parois opaques

Phase	Acteur concerné	Vigilance
APS à DCE	Architecte, BET, économiste	Prendre en compte les ponts thermiques structurels (intégrés)

❖ Définition

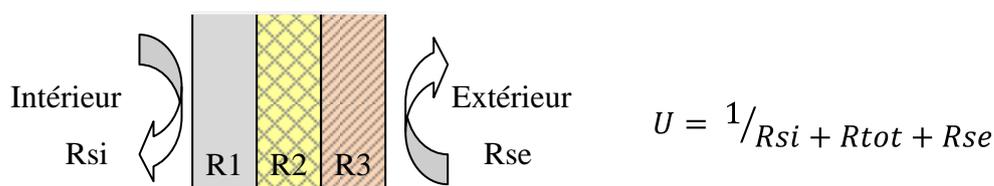
La performance d'une paroi opaque est définie par plusieurs valeurs :

- **La résistance thermique R** : elle caractérise le niveau d'isolation d'un composant d'une paroi (isolant, béton, bois...) : **plus elle est élevée, meilleure est l'isolation**. Elle est exprimée en $m^2.K/W$ et se calcule à partir de l'épaisseur (e , en m) et de la conductivité (λ , lambda, en $W/m.K$) de chaque composant d'une paroi :
$$R = e/\lambda$$

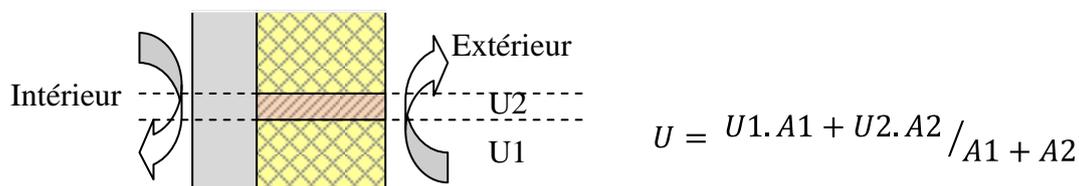
Lorsqu'une paroi comporte plusieurs matériaux successifs, les résistances s'ajoutent :



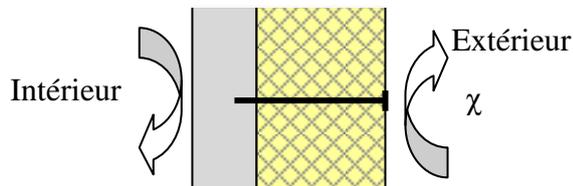
- **Le coefficient de transmission surfacique U** : il caractérise la paroi complète. Sa valeur indique la quantité de chaleur qui traverse un m^2 de parois pour $1^\circ C$ d'écart entre intérieur et extérieur : ainsi, **plus la paroi est performante, plus la valeur U est faible**. Elle est exprimée en $W/m^2.K$, et se calcule de la façon suivante :
 - Pour une paroi simplement composée de couches homogènes, il suffit de prendre en compte les résistances R des différentes couches, et des résistances superficielles intérieures (R_{si}) et extérieures (R_{se}), qui sont tabulées dans les règles ThU :



- En revanche, lorsqu'une paroi est composite, comme par exemple un mur à ossature bois, il faut faire une moyenne des valeurs U au prorata des surfaces (A_i , en m^2) :



- Enfin, lorsque la paroi comporte des ponts thermiques intégrés, ou ponts thermiques structurels, **comme des chevilles, des équerres, des rails métalliques**, etc., il faut ajouter cette déperdition de chaleur supplémentaire à la valeur U. Cette déperdition se calcule à partir des valeurs χ (X_{si}) pour les défauts ponctuels (chevilles, équerres,...) exprimée en W/K , avec leur nombre n pour une surface A donnée ; et ψ (P_{si}) pour les défauts linéaires (rails, poutrelles...) exprimée en $W/m.K$, avec la longueur l (en m) pour une surface A donnée :



$$U_{tot} = U + \chi \cdot n/A + \psi \cdot l/A$$

❖ Ordres de grandeur

Fourchette de valeurs U :

Niveau de perf	Rénovation facteur 4	BBC / RT2012	Passif
Murs	0,20 à 0,27 W/m ² .K	0,15 à 0,25 W/m ² .K	0,13 à 0,18 W/m ² .K
Toiture	0,10 à 0,13 W/m ² .K	0,13 à 0,15 W/m ² .K	0,10 à 0,13 W/m ² .K
Plancher bas	0,22 à 0,40 W/m ² .K	0,15 à 0,25 W/m ² .K	0,13 à 0,15 W/m ² .K

NB : Ces valeurs sont données à titre purement indicatif, et ne sont en aucun cas des règles de conception. Ces valeurs dépendent fortement de l'usage, du lieu, et de l'ensemble de la conception du bâtiment.

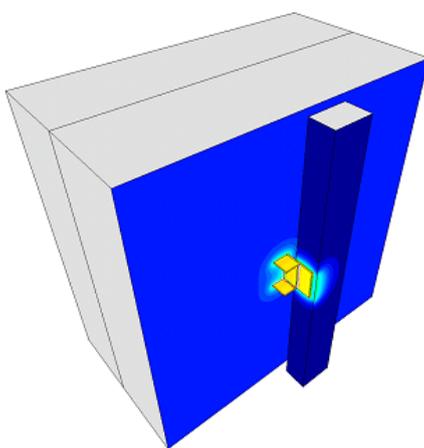
Dans le cas de la rénovation, les obligations de moyens des Appels à Projets sont basées sur les travaux d'Enertech, dont la dernière mise à jour est le tableau des 10 solutions techniques de référence. Plus d'information sur www.enertech.fr.

❖ Point de vigilance : les ponts thermiques structurels

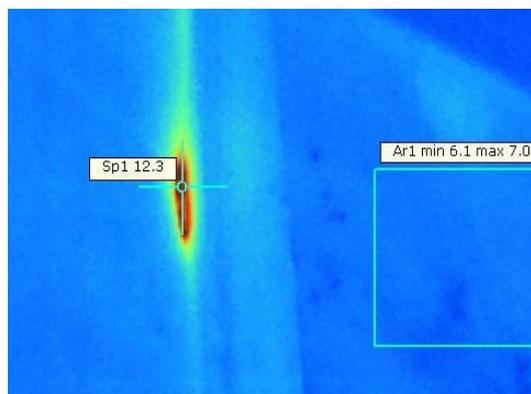
L'absence de prise en compte des **ponts thermiques structurels** (ou intégrés) est le principal écueil à éviter en phase de conception. Le sujet est en effet assez peu connu, alors qu'**il peut avoir un impact majeur sur la performance thermique**.



Exemple d'ITE avec équerre traversant tout l'isolant



Modélisation par éléments finis d'une équerre métallique (hors AAP)



Thermographie infrarouge d'une équerre affleurant sur l'isolant (hors AAP)

Dans les exemples illustrés ci-dessus, **les équerres métalliques traversant l'isolant dégradent de +50% la performance thermique de la paroi**. On croyait avoir un U de 0,22 W/m².K, et on obtient en fait U = 0,33 W/m².K. Cela fait une énorme différence !

Compilations de valeurs de ces ponts thermiques structurels :

Parois	Type	Description	Xsi W/K	Psi vertical W/m.K	Psi horiz. W/m.K	Source
ITE	Equerres	Métallique	0.0417			Trisco - Etude Physibel pour Enertech
		Métallique avec cale rupteur de pont thermique	0.0365			
		Acier âme simple - sur béton	0.0350			
		Acier âme double - sur béton	0.0550			CSTB - Calcul normatif des PTS ossature métallique en ITE
		Acier âme simple + cale - sur béton	0.0250			
		Acier âme double + cale - sur béton	0.0450			
		Alu âme simple - sur béton	0.0550			
		Alu âme double - sur béton	0.0850			Documentation technique d'un fabricant
		Equerre fibre de verre - sur béton+10cm d'isolant	0.0140			
	Equerre fibre de verre - sur béton+20cm d'isolant	0.0060				
	Cheville	Cheville classique - sur béton	0.0080			ATE d'un fabricant
		Cheville acier galva à rupture thermique - sur béton	0.0040			
		Cheville inox à rupture thermique - sur béton	0.0020			ATEC d'un fabricant
Cheville et âme plastique		0.0012			ATE d'un fabricant	
ITI	Structure	Structure métallique classique de doublage	0.0400	0.0050	0.0020	Règles Th-U
		Structure à faible pont thermique	0.0006	0.0050	0.0020	DTA d'un fabricant
Rampant	Suspente	Suspente métallique classique - sur chevron bois	0.0154			Etude sous Heat3 réalisée par Enertech
		Suspente à faible pont thermique - sur chevron bois	0.0024			Documentation technique d'un fabricant

Les solutions les plus performantes à l'heure actuelle sont repérées en vert.

NB : on note que les cales plastiques à insérer entre une équerre et le mur dans le cas d'une ITE n'ont que très peu d'impact. Il est nécessaire de rechercher une solution plus performante.

Exemple de calculs de la dégradation de la performance : comparaison des épaisseurs à mettre en œuvre pour atteindre une résistance thermique donnée :

ITE							Résistance visée : R=4,5 m².K/W						
Parement		Sous enduit			Sous bardage								
Fixation	Cheville classique	Cheville faible pont thermique	Structure bois + cheville	Equerre métallique	Montant bois + équerre métal recouverte 4cm	2 structures bois croisées							
Dégradation du R	-25%	-6%	-12%	-32%	-21%	-16%							
Laine de bois	180 + 60mm	130 + 60mm	140 + 60mm	-	220 mm	160 + 50mm							
Laine de roche 0,036 W/m.K	220 mm	180mm	-	-	-	-							
Laine de verre 0,035 W/m.K	-	-	-	230 mm	200 mm	140 + 50mm							
PSE graphité 0,032 W/m.K	190 mm	150 mm	-	230 mm	200 mm	141 + 50mm							

ITI Résistance visée : R=4,5 m².K/W				
Nb de lit d'isolant	1 seul lit		2 lits	
Fixation	Equerre métallique	Support à faible pont thermique	Lit 1 : équerre métallique Lit 2 : rail métallique	Lit 1 : équerre métallique Lit 2 : support à faible PTS
Dégradation du R	-32%	-3%	-10%	-7%
Laine de bois 0,038 W/m.K	250 mm	180 mm	150 + 50 mm	130 + 50 mm
Laine de verre GR32 0,032 W/m.K	210 mm	150 mm	120 + 50 mm	100 + 50 mm
Remarque :	Prévoir lame d'air pour protéger le freine vapeur		Freine vapeur protégé par le second lit d'isolant	

Toiture Résistance visée : R=7,5 m².K/W					
Configuration	Sous charpente, en rampants			En comble	
Fixation	Equerre métallique	Support à faible pont thermique	Poutre en I	Déroulé	Insufflé (épaisseur avant tassement)
Dégradation du R	-14%	-5%	-8%	-4 à 6% si charpente recouverte	
Ouate de cellulose 0,041 W/m.K	150+210mm	150+180mm	330 mm	-	375 mm
Laine de bois 0,038 W/m.K	150+180mm	150+150mm	300 mm	-	-
Laine de verre 0,035 W/m.K	150+150mm	150+130mm	280 mm	280 mm	375 mm
Laine de verre GR32 0,032 W/m.K	150+120mm	150+110mm	260 mm	260 mm	-

Sous face de dalle Résistance visée : R=2,8 ou 4,5 m².K/W				
Résistance	2.8		4.5	
Flocage 0,046 W/m.K	130 mm		210 mm (Avec treillis de renfort)	
Cheville	Métal	Plastique	Métal	Plastique
Dégradation du R	-16%	-4%	-26%	-8%
Laine de bois / PSE blanc: 0,038 W/m.K	130 mm	110 mm	230 mm	180 mm
PSE graphité 0,032 W/m.K	110 mm	100 mm	200 mm	150 mm

❖ Bonnes pratiques

- ✓ Optimiser le catalogue des parois selon l'objectif de performance, sur la base de la simulation dynamique le cas échéant.
- ✓ **Prendre en compte les ponts thermiques structurels.** Sur la base des exemples ci-dessus, on retient notamment :
 - Recourir systématiquement à des chevilles à faible pont thermique structurel ($\chi < 0,002$ W/K, valeur à vérifier dans l'avis technique ou équivalent), pour l'isolation par l'extérieur et pour l'isolation en sous-face d'un plancher (sous réserve de la tenue au feu nécessaire),



Exemple d'isolation par l'extérieur avec chevilles à faible pont thermique



Exemple d'isolation par l'intérieur avec appui à faible pont thermique

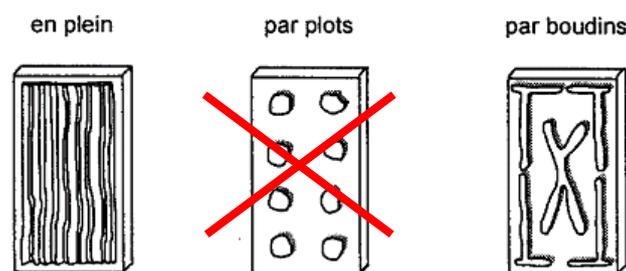


Exemple d'isolation en rampant avec support à faible pont thermique

- Privilégier les structures à deux lits d'isolant : chaque lit permet de rompre les ponts thermiques de l'autre,
- En doublage intérieur et en rampants, utiliser des structures avec appui plastique à faible pont thermique.

Rédaction du DCE

- ✗ **Proscrire des CCTP la formule « isolation selon études thermique ».** Au contraire, détailler précisément pour chaque paroi les isolants voulus, avec leurs caractéristiques (épaisseur, conductivité, résistance thermique), ainsi que la nature des équerres et des chevilles (préciser la valeur χ voulue) ainsi que leur nombre au m² ;
- ✓ Réaliser un **carnet de détails** pour toutes les parois complexes (ITE avec bardage, isolation de rampants, etc.) ;
- ✓ Vérifier la cohérence entre le DCE (pièces écrites et graphiques) d'une part, et la STD et le calcul réglementaire de l'autre ;
- ✓ Pour les isolants collés, **préconiser la pose collée en plein ou par plot et boudin périphérique.** En effet, la pose par plot peut créer une lame d'air froide qui by-passe l'isolant.



Type d'encollage en ITE : schéma tiré du Cahier des Prescriptions Techniques 3035 du CSTB. La pose par plots génère une lame d'air entre l'isolant et le mur, qui dégrade la performance de la paroi.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Performance des parois opaques			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Neuf	Non prise en compte des ponts thermiques structurels	Performance selon calcul réglementaire.	Performance selon STD, niveau Passif.
Réhabilitation		Réduire les ponts thermiques structurels.	Performance selon Solutions techniques de référence

❖ *Pour aller plus loin*

- Règles Th-U pour les règles de calcul de R et de U, valeurs par défaut de χ et ψ , etc.
- Ponts thermiques structurels : Fiche technique sur les ponts thermiques réalisée par Enertech, pour la MAF (Mutuelle des Architectes Français), disponible sur le site www.enertech.fr

2.2.4 Le traitement des ponts thermiques

Phase	Acteur concerné	Vigilance
APS à DCE	Architecte, BET, économiste, BE structure	Travail d'équipe à réaliser : structure, étanchéité à l'eau... Carnet de détail nécessaire.

❖ Définition

Les ponts thermiques sont les déperditions générées par des liaisons de parois ou d'éléments constructifs entre eux (dalle, mur, menuiserie, poutres...). Ces pertes de chaleur (ou de fraîcheur en été) viennent en surplus par rapport aux déperditions dites surfaciques, présentées au chapitre précédent. Les ponts thermiques sont caractérisés dans la plupart des cas par une valeur linéique désignée par la lettre ψ et exprimée en Watt par mètre linéaire et par degré (W/m.K). Certains ponts thermiques dits ponctuels, comme les poteaux, ont une valeur unitaire nommée χ qui est exprimée en W/K.

Les règles de calcul des ponts thermiques sont détaillées dans les règles Th-U de la réglementation thermique (fascicule 5). Dans la norme française la valeur d'un pont thermique est calculée par différence avec la déperdition normale des parois concernées *mesurées en cotes intérieures*.

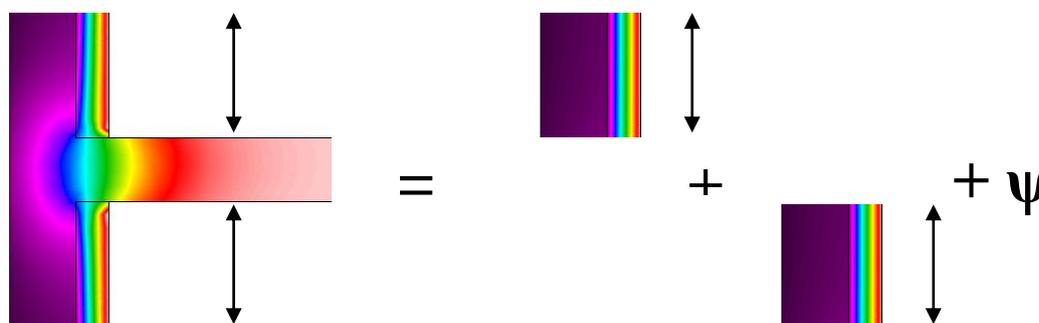


Illustration de la norme française de calcul des ponts thermiques. Modélisation sous THERM : les couleurs représentent la température dans la paroi, du plus chaud (en rouge) au plus froid (en violet).

Il est également important de noter que pour une isolation donnée, un pont thermique est créé par l'augmentation de la surface développée. C'est pourquoi par exemple une poutre, même isolée sur trois faces avec une épaisseur constante, crée un pont thermique non négligeable :

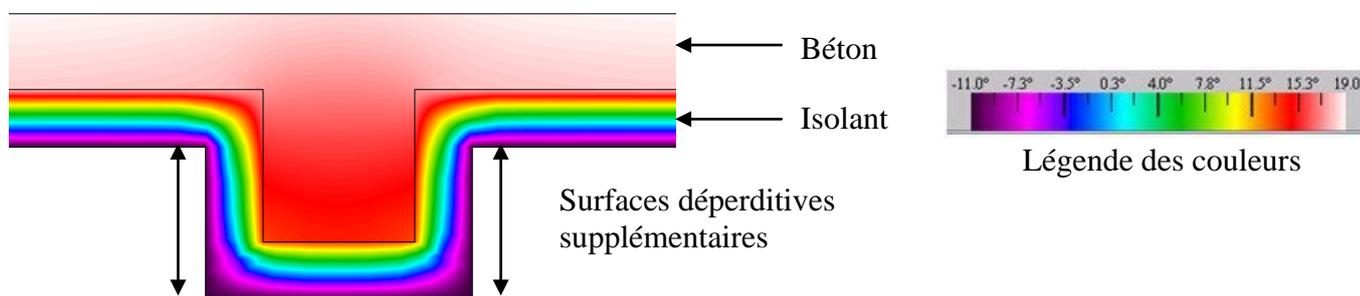


Illustration du pont thermique créé par augmentation de surface développée. Ici $\psi = 0,1 \text{ W/m.K}$, mais la valeur peut être encore plus élevée avec une retombée de poutre plus importante. Modélisation sous THERM réalisée par Energetech.

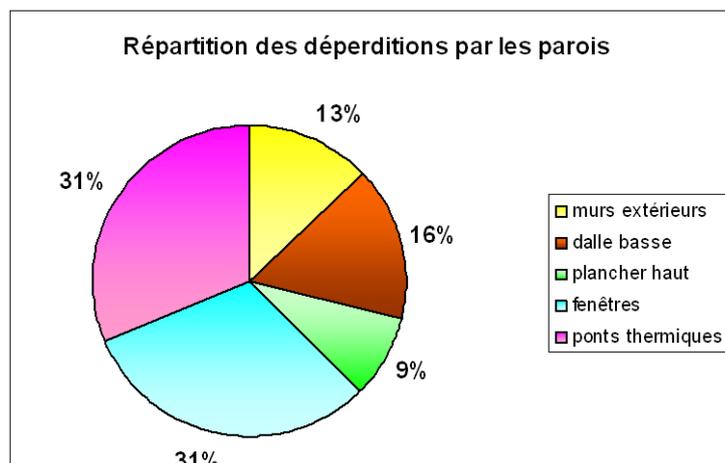
❖ Enjeux

Dans un bâtiment très performant, les ponts thermiques représentent couramment **environ un tiers de la déperdition** par les parois (hors infiltrations et ventilation, voir exemple ci-contre).

NB : dans l'exemple ci-contre les ponts thermiques ont été traités de manière performante. Sans cela, les ponts thermiques peuvent représenter jusqu'à 50% des déperditions par les parois.

Les ponts thermiques deviennent donc un enjeu essentiel de la conception, pour lequel une optimisation est nécessaire.

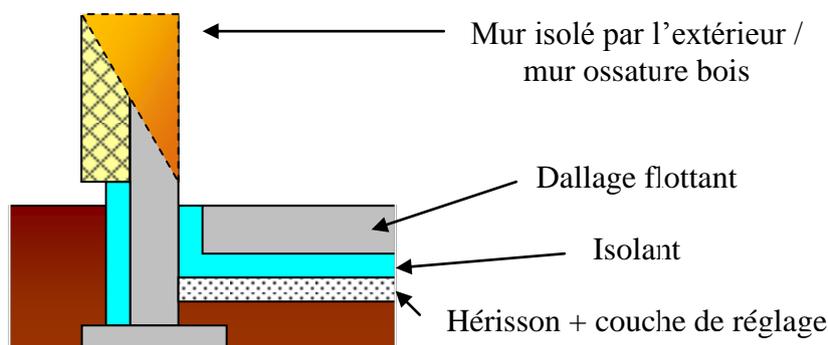
De plus, au delà de l'aspect performance thermique, l'existence de ponts thermiques importants génère des points froids, sur lesquels l'humidité va se condenser, ce qui entraîne un risque : le point de rosée peut être atteint, ce qui génère un risque pour la pérennité du bâti.



❖ Points de vigilance

Liaison plancher bas – mur extérieur

- ✓ La solution la plus performante mise en œuvre dans le cadre de l'appel à projet est la dalle flottante sur isolant, mise en œuvre notamment sur plusieurs maisons individuelles :



Coupe de principe d'isolation sous dalle flottante.

- ✗ Dans le cas de dallages portés sur vide sanitaire ou sous sol, les solutions se limitent à prévoir des retombées d'isolant sur tous les murs (ainsi que les refends sous le volume chauffé), ce qui reste moyennement performant.
- ✗ En rénovation, l'isolation du plancher bas n'est pas toujours possible. Prévoir au moins l'isolation périphérique (enterrée ou horizontale) de la dalle.

Ci-contre : exemple d'isolation périphérique horizontale (hors AAP)



Liaison des murs extérieurs avec les balcons

Les ponts thermiques de valeur ψ la plus élevée sont ceux des balcons. Afin de réduire ces ponts thermiques, on peut :

- ✓ prévoir une rupture thermique en mettant une réservation pour un isolant entre le mur et le balcon, celui-ci étant porté par des bandes noyées ponctuelles. Cette solution présente un surcoût quasiment nul, mais laisse des points froids au droit des bandes noyées ;
- ✓ recourir à des rupteurs de pont thermique : ceux-ci ont la réputation d'être chers, mais cela dépend en fait beaucoup du porte-à-faux du balcon. Cette solution reste moins chère que des balcons autoportés ;



Balcon partiellement désolidarisé, porté par bandes noyées (hors AAP)



Rupteur de pont thermique pour balcon (hors AAP)



Balcon semi-porté, en structure métallique et platelage bois



Balcon totalement désolidarisé (hors AAP) : noter que leur taille permet d'y placer une table

- ✓ la solution la plus performante est de désolidariser totalement les balcons, qui sont alors portés par une structure extérieure. L'intérêt peut être alors de créer de grands balcons qui constituent une véritable pièce en plus.

On peut tout à fait mixer ces solutions : par exemple pour réduire le porte-à-faux d'un balcon de grande taille avec rupteur de pont thermique, on peut prévoir qu'il repose sur des poteaux.

A noter que ces solutions nécessitent d'être **étudiées suffisamment tôt** avec le bureau d'étude thermique, l'architecte, l'économiste et le bureau d'étude structure, car les détails peuvent s'avérer complexes notamment au droit des portes-fenêtres pour **assurer à la fois la performance thermique, l'étanchéité à l'eau, et l'accessibilité handicapés...**

Ponts thermiques en toiture

- ✓ Dans le cas de toitures terrasses avec acrotères, il est nécessaire d'**isoler les 3 faces de l'acrotère**.
- ✓ Les **traversées de réseaux fluides**, notamment de ventilation, génèrent un détail d'étanchéité à l'eau qui est parfois difficile de concilier avec la performance thermique. La meilleure solution conçue dans le cadre de l'appel à projet est de réaliser des relevés sur cadre métallique, remplis d'isolant, et recouverts par une pièce de zinguerie ou une chape recevant l'étanchéité :



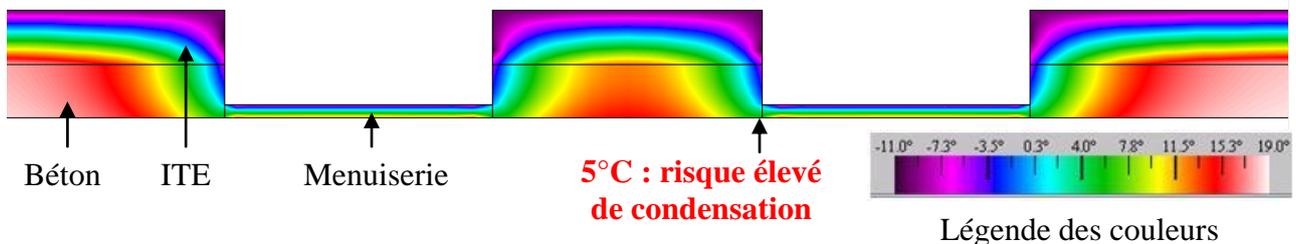
Relevé d'étanchéité sur cadre métallique rempli d'isolant.



Etanchéité supérieure sur pièce de zinguerie ou sur chape.

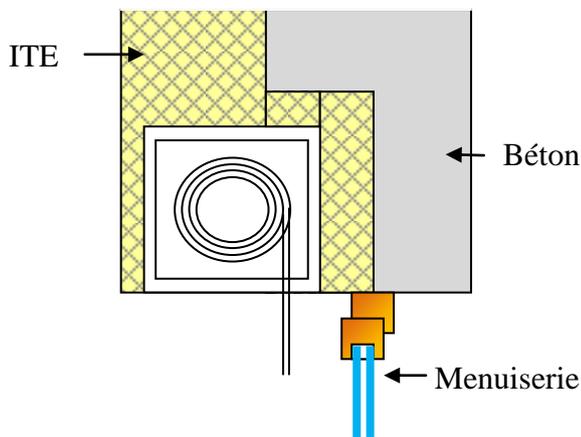
Ponts thermiques autour des menuiseries

- ✗ En neuf comme en rénovation, il est impératif de **traiter les ébrasements de menuiseries**. On voit encore malheureusement de nombreuses rénovations où l'isolation intérieure ou extérieure ne rejoint pas les menuiseries. Il reste alors un pont thermique très important qui peut provoquer d'importantes pathologies, dont le moisissement du dormant bois existant dans le cas de menuiseries en « pose rénovation » sur un ancien cadre bois.



Modélisation sous THERM d'une isolation extérieure avec menuiseries au nu intérieur sans retour d'isolant en tableau : les points froids sont tels qu'ils provoquent un sentiment d'inconfort (parois froide) et un risque élevé de condensation.

- ✗ **Ne pas négliger les ponts thermiques des ébrasements de menuiseries** (appui, tableau et linteau) : les valeurs ψ sont faibles, mais les longueurs cumulées sont très importantes.
- ✓ L'isolation des **coffres de volets roulants** est également à traiter. On verra en partie 2.2.6 que les coffres extérieurs sont préférables du point de vue de l'étanchéité à l'air. Le détail ci-dessous permet de traiter efficacement le pont thermique entre le coffre de volet roulant et le mur, en mettant en réservation en linteau deux épaisseurs d'isolant, l'une étant conservée pour rompre le pont thermique, et l'autre étant déposée pour faire rentrer le coffre dans le mur, et préserver l'alignement de l'ITE finie :



Exemple de détail de traitement du pont thermique du volet roulant extérieur.

Photo de la mise en œuvre du détail précédent.

❖ Bonnes pratiques

- ✓ Afin de réduire les ponts thermiques de liaison entre les dalles et refends et les murs extérieurs, l'**isolation thermique par l'extérieur** apparaît comme une solution très efficace. On peut souligner également l'intérêt technique et économique de la double isolation intérieure + extérieur, qui présente l'avantage de faciliter l'incorporation des réseaux électriques.
- ✓ Une opération de l'Appel à Projets a également été réalisée en **prémurs isolés**. Cette solution récente, couplée avec des rupteurs de ponts thermiques pour les coursives, c'est avérée performante malgré sa mise en œuvre délicate.
- ✓ Enfin, les **murs à ossature bois** présentent tous les atouts de l'isolation par l'extérieur en termes de traitement des ponts thermiques, avec une épaisseur de mur généralement plus faible, et un bien meilleur bilan d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), notamment sur l'indicateur Réchauffement Climatique, puisque ce mode constructif constitue un « puits de carbone » (voir § 2.4.2).

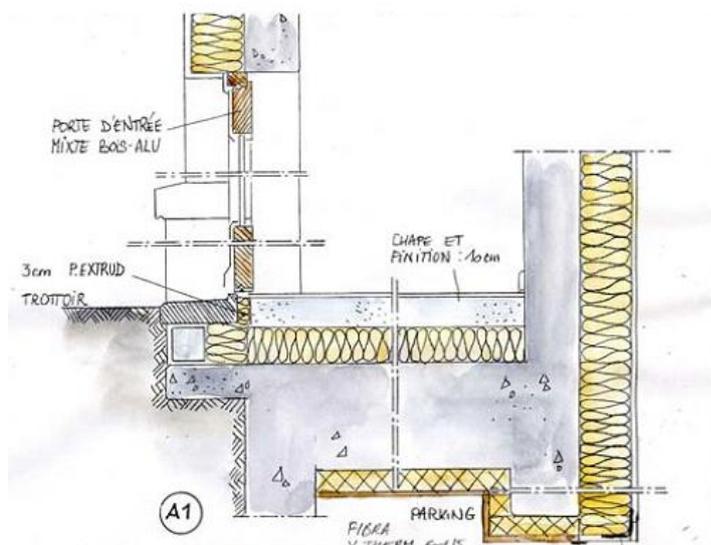
Bonnes pratiques pour la rédaction du DCE

- ✓ La réalisation d'un carnet de détail des ponts thermiques devient une nécessité compte tenu de l'importance de l'enjeu.

En effet, la réalisation de ce carnet de détail permet d'anticiper des problèmes qui sinon seraient abordés dans l'urgence sur le chantier.

Il permet de définir clairement ce qui est attendu des entreprises, ce qui leur permet de chiffrer de façon plus précise.

Ci-contre : extrait d'un superbe carnet de détail, par ailleurs très complet.



- ✓ Assurer la cohérence entre les hypothèses de la STD et les carnets de détail du DCE.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Traitement des ponts thermiques			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Neuf	Acrotère non isolé, poutre non isolées sur ses trois faces, pont thermique de balcon non traité...	Faire un carnet de détail (architecte). Balcon porté par bandes noyées.	ITE, ossature bois. Balcon désolidarisé ou rupteur de pont thermique.
Réhabilitation	Absence d'isolation en ébrasement des menuiseries	Plancher bas sur terre-plein : isolation périphérique. Eviter les points froids (risque de pathologie)	ITE (selon contraintes architecturales et urbanistiques)

❖ *Pour aller plus loin*

- *Catalogue des ponts thermiques courants : règles Th-U, fascicule 5,*
- *Ponts thermiques « exotiques » : outil de calcul gratuit THERM, du LBNL,*
- *Fiche technique sur les ponts thermiques réalisée par Enertech pour la MAF (Mutuelle des Architectes Français), disponible sur www.enertech.fr*

2.2.5 Performance des menuiseries

Phase	Acteur concerné	Vigilance
APS à DCE	Architecte, BET, économiste	Uw, Ug, facteur solaire g, classement A*

❖ Définition

La performance d'une menuiserie se mesure sur plusieurs critères. Les principaux sont le coefficient de transmission thermique Uw, le facteur solaire g du vitrage, et le classement d'étanchéité à l'air A*.

Le coefficient Uw, exprimé en W/m².K, décrit la quantité de chaleur qui traverse un mètre carré de menuiserie pour un degré d'écart entre intérieur et extérieur. Ainsi plus la menuiserie est performante, plus la valeur Uw est faible. Cette valeur se calcul comme suit :

$$U_w = \frac{U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + \psi_g \cdot l_g}{A_g + A_f}$$

Où : Ug est le coefficient surfacique du **vitrage** (*glass* en anglais), en W/m².K,

Ag est la surface de vitrage, en m²,

Uf est le coefficient surfacique du **cadre** (*frame* en anglais), en W/m².K,

Af est la surface du cadre, en m²,

ψg est le coefficient linéique du pont thermique entre le vitrage, l'**intercalaire**, et le cadre, en W/m.K. Les intercalaires dits « warm edge » permettent de réduire cette valeur.

lg est la somme des périmètres des vitrages, en m.

Le facteur solaire g d'un vitrage exprime la quantité de chaleur du soleil que le vitrage laisse passer. Plus ce facteur solaire est élevé, plus la chaleur du soleil rentre facilement, ce qui est une bonne chose en hiver, et un risque de surchauffe en été. On distingue ainsi des vitrages à haut facteur solaire favorisant les apports gratuits (notamment des triples vitrages ayant un facteur solaire proche des doubles vitrages), et à l'inverse des vitrages à contrôle solaire destinés à améliorer le confort d'été.

NB : le facteur solaire est différent du facteur de transmission lumineuse. Les vitrages à contrôle solaire dits « sélectifs » permettent ainsi de réduire les apports de chaleur (par exemple g=0,33) tout en conservant le confort visuel (pour le même exemple TL = 60%).

Le classement d'étanchéité à l'air A* est le premier indicateur du classement AEV d'une menuiserie. Les classes A1 à A4 qualifient le débit de fuite au mètre carré de surface et au mètre linéaire de joint. Le classement A4 est le meilleur.

❖ Enjeux

Ordre de grandeur de l'impact de la performance des menuiseries sur le besoin de chauffage

	Double Vitrage de base	Double Vitrage performant	Triple Vitrage de base	Triple Vitrage de base et haut facteur solaire	Triple Vitrage passif	Triple Vitrage passif et haut facteur solaire	
Uw	1,7	1,3	1,1	1,1	0,8	0,8	W/m ² .K
Facteur solaire g	0,61	0,61	0,51	0,58	0,51	0,58	
Besoin de chauffage	19,9	16,2	16,4	15	13,6	12,4	kW.h/m ² _{SHAB} .an
Variation	+33%	+8%	+9%	référence	-9%	-17%	

Exemple d'impact de la performance des menuiseries sur un bâtiment de logements isolé au niveau Passif, de surface de menuiseries représentant 18% de la SHAB, répartis 15% au Nord, 45% au Sud, 20% à l'Est et 20% à l'Ouest

Dans le tableau ci-dessus, on note l'**impact important de la variation de la performance Uw** à facteur solaire égal. L'importance de cet impact est la conséquence de la part importante que représentent les déperditions par les menuiseries dans les déperditions par les parois (généralement entre un tiers et la moitié, voir l'exemple de graphique de répartition au paragraphe 2.2.4).

On remarque aussi l'équivalence de performance entre un double vitrage performant et un triple vitrage de base à facteur solaire classique. Ceci est particulièrement vrai sur l'orientation Sud, mais ne se retrouve pas sur l'orientation Nord. **C'est pourquoi l'optimum technique et économique est souvent de prévoir un bon double vitrage au Sud, et du triple vitrage sur les autres orientations**, de préférence à haut facteur solaire.

La meilleure performance revient évidemment au triple vitrage passif à haut facteur solaire.

Ordre de grandeur de l'impact de l'étanchéité à l'air des menuiseries sur le besoin de chauffage

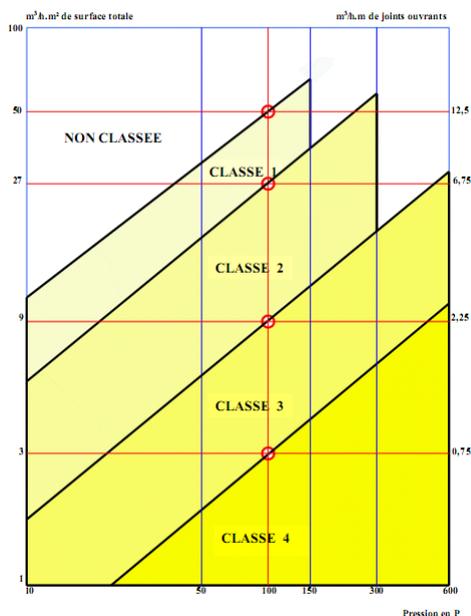
Classement	A1	A2	A3	A4	
Fuites par les menuiseries (selon la norme A.E.V.)	50	27	9	3	m ³ /h par m ² de menuiserie sous 100 Pa
Contribution au n50	2.3	1.2	0.4	0.14	vol/h sous 50 Pa
n50 (exemple)	2.7	1.7	0.9	0.6	vol/h sous 50 Pa
Besoin de chauffage (exemple)	24	19	16	15	kW.h/m ² _{SHAB} .an
Variation	+57%	+29%	+7%	référence	

Exemple d'impact du classement des menuiseries sur un bâtiment isolé au niveau Passif, de surface de menuiseries représentant 18% de la SHAB, et de hauteur sous plafond 2,5m.

On note dans le tableau ci-dessus que la contribution au n50 des seules fuites entre ouvrant et dormant des menuiseries représente plus que l'objectif du Passif (0,6 vol/h) pour les menuiseries classées A1 et A2. **Il est donc impossible d'atteindre un niveau d'étanchéité à l'air Passif avec de telles menuiseries, sur la base des hypothèses utilisées** (18% de ratio de surface de menuiseries sur la SHAB et hauteur sous plafond de 2,5m). Pour des menuiseries A3, les fuites entre ouvrant et dormant des menuiseries représentent les deux tiers de l'objectif, or il faut y ajouter toutes les autres fuites, notamment celles entre le dormant des menuiseries et le bâti, les fuites des traversées de réseaux, etc (voir § 2.2.6) ! C'est donc un pari très risqué, voire impossible à tenir.

❖ Points de vigilance

- ✗ Performance thermique : une fois les parois opaques bien isolées et les ponts thermiques traités, les menuiseries deviennent le principale poste de déperdition par les parois. Elles représentent bien souvent **plus du tiers de ces déperditions**. La performance U_w joue alors un rôle très important dans la performance : il convient donc de prendre des hypothèses réalistes dans les calculs ;
- ✗ Pour les doubles vitrages, la performance U_g généralement prise en compte est $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ceci correspond à un vitrage 4/16/4 peu émissif avec lame d'argon. Attention cependant, le maintien de cette performance **dans le cas de vitrages feuilletés** (vitrages de sécurité, pour les ERP notamment) nécessite des épaisseurs de dormant importantes. Pour ce type de vitrage, il est donc courant que la lame d'argon soit réduite, ce qui dégrade la performance du vitrage et de la menuiserie. Compte tenu de l'impact de la performance des menuiseries sur le besoin de chauffage d'un bâtiment, **ce point doit impérativement être anticipé dès l'APS** et pris en compte dans les calculs.
- De la même façon, si la STD montre que du vitrage à contrôle solaire est nécessaire pour assurer le confort d'été, ce choix va mécaniquement dégrader les apports solaires en hiver, et augmenter les besoins de chauffage. **Le choix d'un vitrage classique ou à contrôle solaire est donc un choix structurant, à faire dès l'APS.**
- Etanchéité à l'air : chaque classe A^* est trois fois plus performante que la précédente : **une menuiserie A4 est donc 3 fois plus étanche qu'une menuiserie A3**, et 9 fois plus étanche qu'une menuiserie A2. A chaque fois que l'on vise une étanchéité à l'air très performante, le classement A4 des menuiseries s'avère nécessaire.



Ci-contre : critères de la norme AEV pour l'étanchéité à l'air. On voit que la norme définit à la fois un débit de fuite maximal rapporté à la surface de la menuiserie et un débit maximal rapporté à la longueur de joint.

Source : Document technique UF.PVC – Norme européenne AEV - guide de l'opérateur.

Ci-contre : exemple de menuiserie avec un double joint.



En pratique, la classe A4 signifie la présence de deux voire trois joints entre ouvrants et dormants, ou alors parfois d'un joint unique de forte largeur et très bien mis en compression (voir aussi les photos d'exemples dans la partie consacrée au suivi de chantier, § 3.2.1).

❖ *Bonnes pratiques*

- ✓ Comme on l'a vu dans la formule du calcul du U_w , la performance des menuiseries dépend entre autres du pont thermique entre vitrage, intercalaire et cadre. C'est pourquoi les fabricants ont développé des intercalaires non pas en aluminium, mais en matériaux composites isolants. On parle alors d'**intercalaires « warm edge »**, ou à bord chaud. La valeur ψ_g est réduite de 0,08 à moins de 0,05 W/m.K pour des menuiseries bois ou PVC, ce qui améliore de façon notable la performance des menuiseries (gain d'environ 0,1 W/m².K sur le U_w pour des dimensions courantes).
- ✓ Assurer la cohérence entre la STD et le DCE : les CCTP devront donc préciser tous les critères de performance des menuiseries : U_w de la menuiserie, U_g , type d'intercalaire, facteur solaire g du vitrage, classement A* de la menuiserie.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse - fourchette de performances (à titre indicatif)			
Niveau de perf	Rénovation facteur 4	BBC / RT2012	Passif
U_w	Triple vitrage à $U_w = 1,1$ W/m ² .K si ITI, double vitrage à $U_w = 1,5$ si ITE	Autour de 1,5 W/m ² .K	0,8 (triple vitrage Passif) à 1,3 W/m ² .K.
U_g (vitrage seul)	Doubles vitrages à $U_g = 1,1$ W/m ² .K, triples vitrages de 0,5 à 0,7 W/m ² .K		
Ψ_g	Intercalaires « warm edge »		
Facteur solaire g	Doubles vitrages de 0,58 à 0,62, triples vitrages de 0,40 à 0,58 ; Double vitrage à contrôle solaire : 0,30 à 0,45. Choisir un vitrage sélectif (permettant de conserver un bon facteur de transmission lumineuse)		
Étanchéité à l'air	A4 recommandé	A4 recommandé	A4 impératif

2.2.6 L'étanchéité à l'air et la migration de vapeur

Phase	Acteur concerné	Vigilance
APS à DCE	Architecte, assisté du BET, économiste	Surtout une question de dessin Conditions de mise en œuvre des produits (T°, UV)

❖ Définition

L'étanchéité, ou perméabilité à l'air, est la capacité d'un bâtiment à empêcher l'air de rentrer de façon parasite.

Le niveau d'étanchéité à l'air est mesuré à l'aide d'une porte soufflante, ou blowerdoor (photo ci-contre). On parle de test d'étanchéité à l'air ou test d'infiltrométrie.

Il existe plusieurs unités pour exprimer le niveau de performance :

Le n50 est l'unité utilisée dans la majorité de l'Europe. Elle représente le taux de renouvellement d'air du bâtiment (en vol/h, volume par heure) sous une pression ou une dépression de 50 Pa.

Le Q4 est l'unité utilisée en France, notamment dans le calcul réglementaire. Elle représente le débit de fuite sous 4 Pa, rapporté à la surface de parois déperditives hors plancher bas. Elle est donc exprimée en m³/h par m² de surface de parois déperditives hors plancher bas.



Ci-dessus : porte soufflante (hors AAP)

Il n'est malheureusement pas facile de passer d'une unité à l'autre, car il faut pour cela :

- ✓ Passer d'une pression de référence de 4 Pa à 50 Pa : ceci nécessite de connaître l'exposant n caractérisant l'écoulement de l'air (variant généralement de 0,5 à 0,7) ;
- ✓ Passer d'une référence en volume à une référence en surface de parois déperditives hors plancher bas, ce qui nécessite de connaître ces deux valeurs.

On peut tout de même retenir que le niveau Passif au sens de PassivHaus, soit $n_{50} = 0,6$ vol/h correspond environ à un Q4 de 0,15 à 0,25 m³/h par m² de surface de parois déperditives hors plancher bas pour une maison individuelle, et de 0,3 à 0,5 pour les logements collectifs et le tertiaire. **Le niveau Passif est donc 2 à 3 fois plus performant que la réglementation RT 2012.**

Il est important de noter que, à qualité de réalisation égale, il sera plus facile d'atteindre un n_{50} performant si le bâtiment est compact.

❖ Enjeux

Etanchéité à l'air

Les enjeux de l'étanchéité à l'air sont multiples : elle impacte en effet non seulement la performance énergétique, mais aussi la pérennité du bâti et son isolation acoustique.

L'impact le plus évident est la **performance énergétique**. L'image la plus simple pour le comprendre est qu'il est inutile de réaliser une bouteille thermos très isolée, si celle-ci est traversée par des courants d'air ! L'impact sur le besoin de chauffage peut être facilement quantifié :

n50 en Vol/h sous 50 Pa	0,6	1,2	3,0	5,0
Variation du besoin de chauffage	Objectif visé	+ 8%	+30%	+60%

Variation relative du besoin de chauffage calculé par simulation thermique dynamique pour un bâtiment BBC (besoin de chauffage de l'ordre de 30 kW.h/m²)

La variation relative est encore plus importante pour un bâtiment passif. Une mauvaise étanchéité à l'air peut ainsi faire doubler le besoin de chauffage d'un bâtiment.

On peut également retenir l'ordre de grandeur d'une **augmentation du besoin de chauffage de 4 kW.h/m².an par unité de n50.**

Une mauvaise étanchéité à l'air peut aussi provoquer des **pathologies du bâtiment** :



Dégradation des soubassements d'une maison à ossature bois par condensations dues aux infiltrations/exfiltrations d'air au droit d'une fuite (Photo : Alsatech)

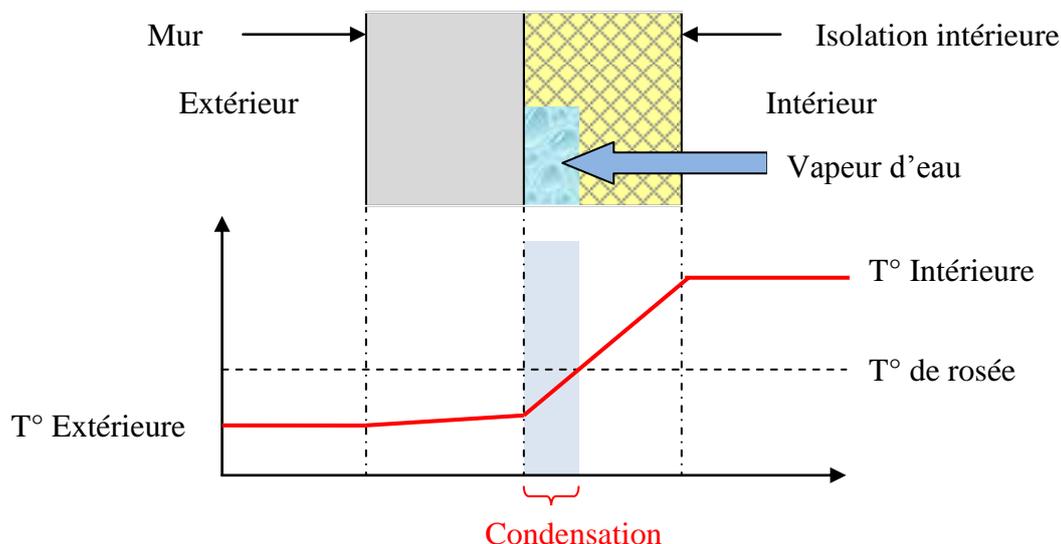
En effet, les exfiltrations d'air emportent avec eux l'humidité de l'air intérieur, qui va se refroidir en traversant le mur et condenser dans le mur. Le mur ainsi mouillé peut alors subir des moisissures voire un pourrissement comme dans l'exemple ci-dessus.

C'est pourquoi le traitement de l'étanchéité à l'air est indissociable du traitement de la migration de la vapeur d'eau.

Maîtrise de la migration de vapeur d'eau en isolation par l'intérieur

En hiver, le phénomène principal est la migration de vapeur d'eau de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur. En effet la vapeur d'eau est produite par la présence (respiration) et l'activité des utilisateurs (cuisine, douche...). Il faut donc contrôler la migration de vapeur d'eau à travers le mur avant que l'humidité n'atteigne une zone trop froide.

Le schéma ci-dessous permet de visualiser ce phénomène dans le cas d'une isolation par l'intérieur :



Coupe d'un mur isolé par l'intérieur et courbe de température dans le mur. La condensation se produit si la vapeur d'eau peut migrer jusqu'à une zone dont la température est en-dessous du point de rosée.

Dans cet exemple, il n'y a aucune barrière à la migration de vapeur d'eau côté intérieur. Il y a un risque très important de condensation dans l'isolant ou sur la maçonnerie.

C'est pourquoi **les membranes d'étanchéité à l'air servent également à réguler la migration de vapeur d'eau**. Les fabricants proposent donc différents produits, qui laissent plus ou moins passer la vapeur d'eau. Cette capacité à laisser passer plus ou moins de vapeur d'eau est exprimée par la **valeur Sd**, qui s'exprime en mètres, et qui représente l'épaisseur d'air qui offre la même résistance à la migration de la vapeur d'eau que la membrane. Plus la valeur Sd est grande, moins la vapeur d'eau peut passer.

On distingue ainsi les **freine-vapeur** (faible valeur Sd, de 0,10m environ à quelques mètres) et les **pare-vapeur** (fortes valeurs Sd, de quelques mètres à 100 m et plus).

Jusqu'à récemment, en isolation intérieure, la stratégie était d'éviter toute migration de vapeur dans les parois et on utilisait donc un pare-vapeur quasi systématiquement. Mais cette technique peut poser plusieurs problèmes :

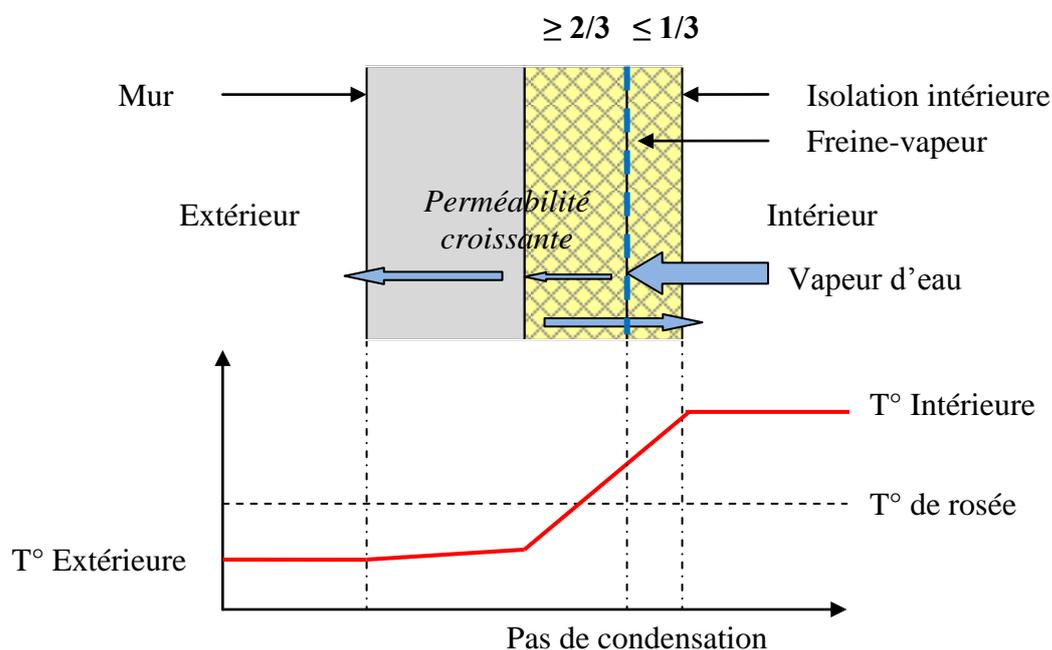
- ✘ en cas de défauts de pose (mauvais raccord entre lés de pare-vapeur par exemple), de la vapeur va passer dans la paroi et s'y retrouver prisonnière du fait de la très haute résistance à la diffusion de vapeur de la membrane ;
- ✘ cette membrane empêche tout séchage des matériaux vers l'intérieur, ce qui peut provoquer des accumulations d'humidité dans la paroi ;
- ✘ en cas d'autres apports d'humidité imprévus (fuites d'eau, remontées capillaires, pluies), le problème est similaire et le séchage est impossible vers l'intérieur.

Dans le cas où la charge en humidité du bâtiment n'est pas trop élevée (ce qui est le cas de la plupart des bâtiments, hors cuisines collectives ou buanderies...), **il est préférable d'utiliser un freine-vapeur** (Sd inférieur à 5 m). En effet, un freine-vapeur va limiter la quantité de vapeur pouvant transiter vers l'interface maçonnerie/isolant, tout en permettant le séchage de la paroi en cas d'humidité accidentelle.

Afin de protéger l'isolant avant que l'humidité n'atteigne la zone froide de l'isolant, **le freine-vapeur doit être positionné du côté chaud de l'isolant**, donc côté intérieur.

Mais par ailleurs, **la membrane d'étanchéité à l'air doit être protégée**, notamment des percements pour la pose des prises électriques ou des interrupteurs. On doit donc créer un espace entre le parement et le

freine-vapeur d'environ 5cm. On peut alors vouloir profiter de cette épaisseur pour placer un second lit d'isolant. Il faut alors d'assurer que la température n'a pas trop chuté dans l'épaisseur de ce premier lit. De façon générale, on utilise alors **la règle dite des 2/3 – 1/3** (citée notamment dans le DTU 31.2, annexe 3 §3.1) : la membrane d'étanchéité à l'air doit être au maximum dans le premier tiers de l'isolant en partant du côté chaud.



Coupe d'un mur isolé par l'intérieur avec freine vapeur positionné selon la règle des 1/3 – 2/3. La condensation ne se produit pas car la vapeur d'eau est régulée avant d'atteindre le point de rosée.

La présence du freine-vapeur permet de réguler la quantité de vapeur atteignant la zone froide (sous le point de rosée). Afin qu'il n'y ait pas d'accumulation de vapeur d'eau, on respecte le **principe de perméabilité croissante** : le freine vapeur doit être plus résistant à la migration de vapeur d'eau que le mur. Ainsi on ne mettra pas la même membrane d'étanchéité à l'air sur un mur en pierre (Sd faible, nécessité d'un freine vapeur à faible Sd pour ne pas perturber l'équilibre du mur existant) et sur un mur en béton (Sd plus élevé requis).

L'action du freine vapeur permet une **circulation de l'humidité dans les deux sens**, ce que ne pouvaient pas faire les pare-vapeurs. Ainsi le mur peut sécher en cas d'humidité initiale (séchage du béton...) ou accidentelle (défaut de pose, fuite d'eau, infiltrations, etc...), ou encore dans le cas d'un mur ancien.

Dans ce cas, il peut être particulièrement intéressant d'utiliser un **freine-vapeur hygrovARIABLE**, c'est à dire un freine-vapeur dont la valeur Sd varie selon la saison. En fonctionnement normal l'hiver, la membrane est relativement fermée à la diffusion (Sd de l'ordre de 10 m) et préserve donc la paroi contre une trop forte charge en humidité ; en revanche en cas d'apport d'humidité imprévu, la membrane s'ouvre à la diffusion pour permettre un séchage vers l'intérieur.

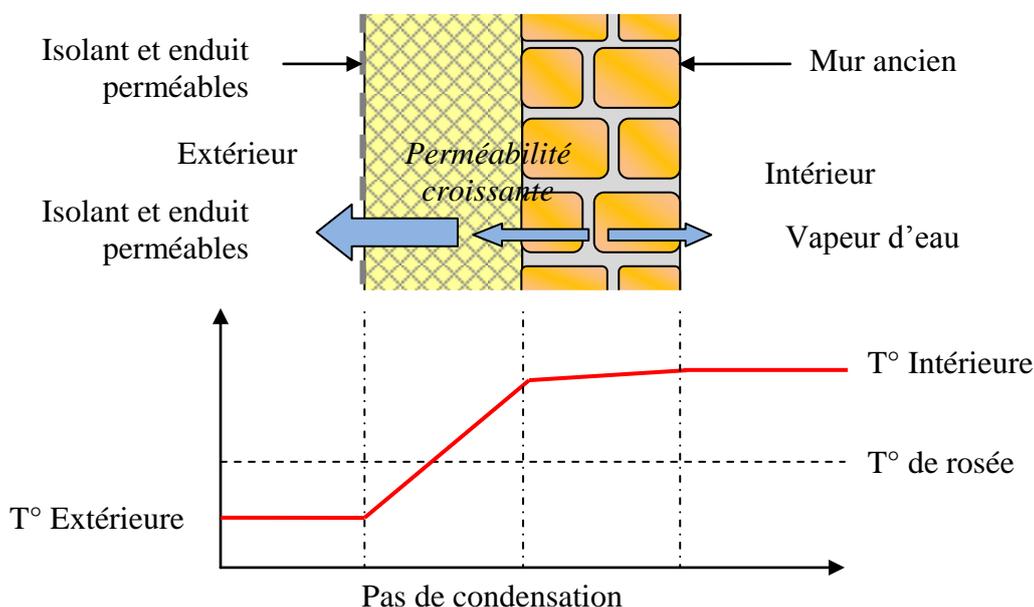
NB : les freine vapeur hygrovARIABLE permettent d'apporter une solution au non respect du DTU : en effet ces matériaux sont couverts par un Avis Technique, qui se substitue aux DTU (règles génériques) pour un produit donné dans un domaine de mise en œuvre donné.

Maîtrise de la migration de vapeur d'eau en isolation par l'extérieur

Le béton faisant office de pare-vapeur, le risque de condensation est inexistant en isolation par l'extérieur sur un mur en béton.

Dans le cas des murs en agglo, il est impératif pour l'étanchéité à l'air de réaliser un enduit. En effet les agglo sont poreux et l'air passe en partie courante (photo par la suite, § points de vigilance). L'enduit (généralement au ciment) sera réalisé côté intérieur, et jouera le rôle de pare-vapeur, ce qui exclu de nouveau le risque de condensation.

Le seul cas qui nécessite une réflexion sur la migration de vapeur d'eau est celui des murs anciens en pierre, en pisé ou encore en mâchefer, qui sont très perméables à la vapeur d'eau. Pour les mêmes raisons qu'exposé précédemment concernant l'isolation par l'intérieur, il est exclu de réaliser un pare vapeur côté intérieur. Si le mur n'est pas étanche à l'air, on réalisera un enduit au plâtre ou à la chaux pour assurer l'étanchéité à l'air. Il faut alors garantir la **perméabilité croissante des matériaux** : en partant de l'intérieur, les matériaux utilisés doivent être de plus en plus perméables à la vapeur d'eau, pour ne pas la bloquer dans l'épaisseur du mur.



Coupe d'un mur ancien isolé par l'extérieur avec isolant et enduit perméable. La condensation ne se produit pas, et l'humidité du mur peut être évacuée des deux côtés.

En pratique, **il est donc fortement recommandé de ne pas poser une isolation par l'extérieur en polystyrène ou en mousse phénolique sur un mur ancien en pierre, en pisé ou en mâchefer.** On préférera les isolants perméables à la vapeur d'eau comme la **laine de bois, de roche, ou de verre**. Si l'ITE est réalisée sous enduit, on en choisira un qui soit très perméable à la vapeur d'eau (idéalement $S_d < 0,5m$).

NB : le polystyrène expansé est plutôt freine-vapeur, et peut parfois être compatible avec une ITE sur mur ancien. Ce n'est cependant pas une règle générale et il faut se méfier. Le polystyrène extrudé, quant-à lui, est plutôt pare vapeur, et serait totalement inadapté en ITE sur un mur ancien. En pratique il n'est de toute façon généralement pas utilisé dans les procédés d'ITE.

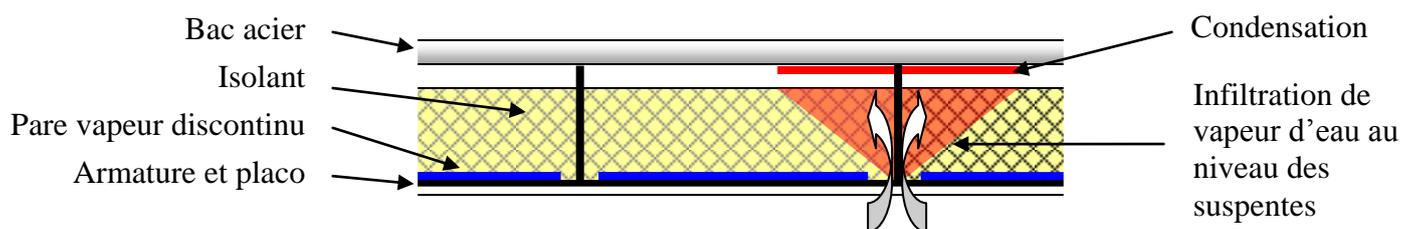
Maîtrise de la migration de vapeur d'eau en toiture

Dans le cas des **toitures traditionnelles**, on recommande la pose d'un freine-vapeur côté intérieur, et d'un pare-pluie HPV (haute perméabilité à la vapeur) côté extérieur.

Pour les **toitures étanchées**, il est nécessaire de contrôler la vapeur d'eau avant l'isolant. Il n'y a rien à prévoir pour toutes les toitures terrasses avec isolant sur dalle béton, car la dalle joue le rôle de pare-vapeur.

Mais dans le cas de **toitures étanchées sur ossature bois**, il est recommandé de mettre en œuvre un pare-vapeur côté intérieur, car l'étanchéité elle-même côté extérieur est imperméable à la vapeur d'eau. Un pare-vapeur est donc nécessaire pour respecter la règle de la perméabilité croissante.

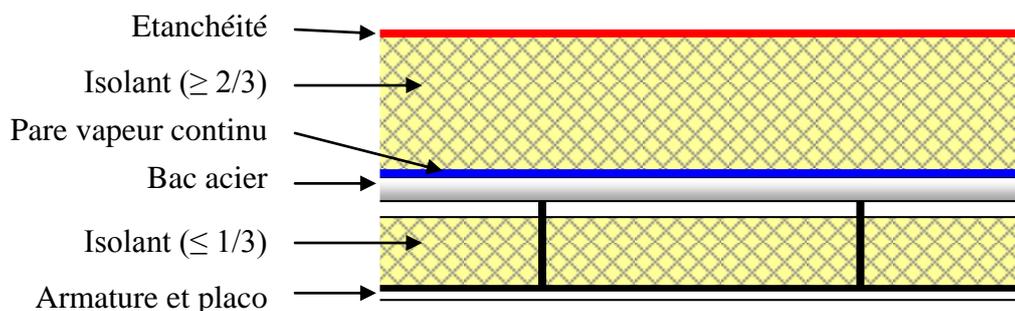
Dans le cas d'une **toiture réalisée avec bac acier** : si on souhaite protéger un isolant sous le bac acier, un pare-vapeur est également nécessaire, car les bacs aciers sont totalement imperméables à la vapeur d'eau. Il est nécessaire de poser ce pare-vapeur en lé continu pour qu'il soit efficace, ce qui est impossible entre les suspentes. On peut alors poser le pare-vapeur sous l'ossature du faux plafond (à l'adhésif double-face). Créer si besoin une lame d'air pour faire passer les réseaux électrique et les boîtiers d'éclairage.



Coupe d'une toiture avec bac acier. Le pare vapeur kraft de l'isolant ne sert qu'à concentrer le problème. La liaison entre les bacs aciers est très difficile à rendre étanche à l'air. Résultat : un risque de condensation et une mauvaise étanchéité à l'air.

Solution : poser le freine vapeur de façon continue sous le rail du placo, à l'aide d'un adhésif double-face. Si besoin, créer un vide technique pour passer les fourreaux électriques avec un profil métallique.

Si on prévoit un isolant au-dessus du bac acier, sous étanchéité, il est plus simple de dérouler un pare-vapeur continu sur le bac acier, et de respecter la règle des 1/3 – 2/3, soit au maximum 1/3 de l'isolation sous le bac acier. En effet il n'est pas possible de liaisonner entre eux les bacs acier à cause des ondulations.



Coupe d'une toiture avec bac acier, avec isolation sur le bac acier. Un pare vapeur continu est nécessaire en raison de la présence de l'étanchéité. La règle des 1/3 – 2/3 est respectée (moins d'un tiers de l'isolant sous le pare vapeur et le bac acier).

Dans le cas du détail ci-dessus, attention à la réalisation de la liaison entre le pare-vapeur et les murs : en effet l'arrête des bacs aciers est coupante et va déchirer le pare-vapeur si aucune précaution n'est prise.

La migration de vapeur d'eau dans les DTU

Les solutions adoptées pour maîtriser la migration de vapeur d'eau doivent en principe respecter les DTU et les règles de l'art (règle des 1/3 – 2/3, etc).

L'approche présentée ici, qui consiste à rechercher la plus faible résistance à la migration de vapeur d'eau chaque fois que c'est possible, est parfois contraire à certains DTU :

- ✗ le DTU 31.2 « Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois » impose un Sd minimal de 18m en construction bois.
- ✗ A noter que le DTU 20.1 « Ouvrage en maçonnerie de petits éléments — Parois et murs » P4 impose en isolation intérieure une perméance de maximale de 0,06 g/m².h.mmHg dans le cas général soit un Sd supérieur à 1,5 m, et de 0,015 g/m².h.mmHg en zone froide (température de base inférieure ou égale à -15°C, ou altitude supérieure ou égale à 900m), soit un Sd supérieur à 6m.

Ceci est contradictoire avec la nécessité de gérer la migration inverse de vapeur d'eau en été (de l'extérieur vers l'intérieur) et de favoriser le séchage des matériaux (lors de la construction, mais aussi dans l'éventualité d'une fuite). En effet, les règles établies dans les DTU ont été définies avant que l'on dispose d'outils de modélisation dynamique de la vapeur d'eau. Ces DTU sont a priori en cours de révision.

En attendant cette révision, les **Avis Techniques (ATEC) permettent de déroger à ces règles générales** pour des produits particuliers et sur des applications bien définies (voir notamment les ATEC des freine vapeur hygrovariables).

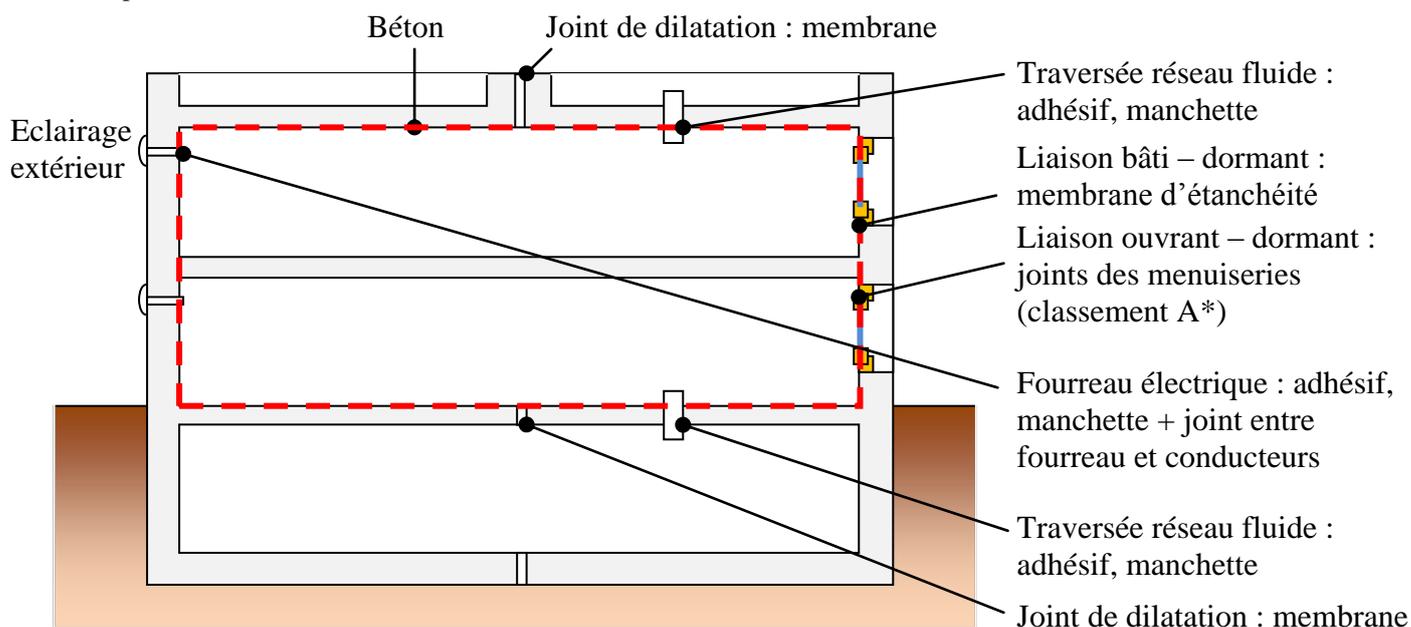
On peut également justifier d'une solution par un **calcul dynamique de migration de vapeur d'eau** (par exemple sous le logiciel WUFI³).

❖ Bonnes pratiques

Les bonnes pratiques de conception ont été abordées lors du Colloque du 21 novembre 2007 à Dijon. Marika Frenette⁴ a présenté l'approche qui consiste à pouvoir **faire le tour de l'enveloppe avec le crayon sans lever la pointe** sur tous les plans et toutes les coupes du bâtiment.

Ce principe, qui peut sembler simple, permet toutefois de se poser toutes les bonnes questions. Car les occasions de lever la pointe du crayon sont nombreuses...

Exemple sur bâtiment en béton :

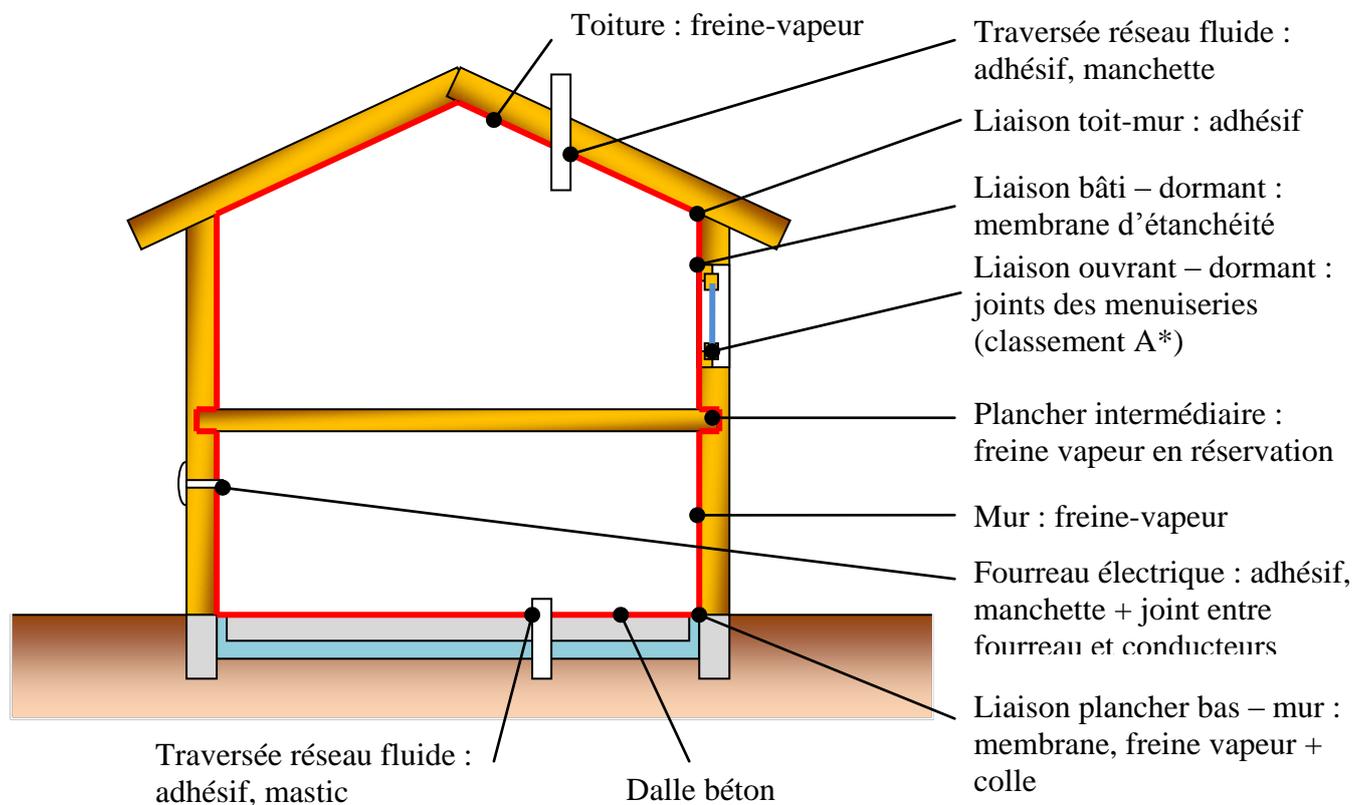


³ Logiciel du Fraunhofer Institut. Site internet : <https://wufi.de/>

⁴ Architecte, Directrice du cabinet d'architecture WIGWAM Conseil : <http://www.wigwam-conseil.com/>

Les schémas ci-dessus et ci-dessous présentent le tour de l'enveloppe étanche à l'air, les difficultés rencontrées, ainsi que des solutions possibles.

Exemple sur maison à ossature bois :



Certaines des solutions présentées dans les schémas ci-dessus sont encore inhabituelles en France : membranes d'étanchéité pour les fenêtres, freine vapeur en réservation au droit des planchers, manchettes, adhésifs spécifiques...

Lors du même colloque, Walter Unterrainer⁵, architecte du Vorarlberg a déclaré : « **chez nous en Autriche, le joint à la pompe commence là où l'intelligence s'arrête** ».

En effet il existe à présent des solutions beaucoup plus performantes et beaucoup plus pérennes que les joints extrudés. Celles-ci sont des membranes et adhésifs adaptés au support (avec bande butyl sur supports poreux comme le béton et le bois), des colles pour freine-vapeur, des manchettes, etc. Ces solutions sont les seules qui garantissent une étanchéité à l'air très performante, et pas seulement au moment du test d'infiltrométrie.

Il est important de souligner que la qualité de l'étanchéité à l'air **se joue essentiellement lors de la conception**. Ce qui est bien conçu se réalise facilement et sans surcoût.

Bonnes pratiques en phase de conception

- ✓ Définir le volume étanche à l'air. Faire coïncider autant que possible volume étanche et volume chaud (voir § 2.2.1, p 23),
- ✓ Exclure la chaufferie du volume étanche (à cause de la ventilation haute et basse),
- ✓ Exclure si possible les ascenseurs du volume étanche,

⁵ <http://www.architekt-unterrainer.com/>

- ✓ Réaliser des coupes, trouver les solutions appropriées à chaque jonction,
- ✓ En ITI, prévoir une lame d'air / second lit d'isolant qui protège le freine vapeur contre les percements pour la pose des prises électriques et des interrupteurs.

Bonnes pratiques en phase de rédaction du DCE

Il est fondamental de se souvenir qu'**une bonne étanchéité à l'air ne peut pas s'improviser sur le chantier**. Elle doit être conçue et décrite dans les CCTP. Ainsi l'entreprise sait ce qu'on attend d'elle, et peut prévoir son chiffrage et commander le matériel en connaissance de cause.

En phase DCE, il est donc nécessaire de :

- ✓ Réaliser des **cahiers de détails**,
- ✓ Expliciter dans les CCTP les **objectifs de perméabilité visés pour l'opération**. On précisera que des tests d'étanchéité à l'air seront réalisés en cours de chantier. On recommande la réalisation de deux tests :
 - Le premier test, en cours de chantier dès le clos couvert, apparaît comme le plus important. Il permet de valider la mise en œuvre avant la pose des doublages, c'est à dire avant que la reprise des défauts ne nécessite des déposes, qui ne sont souhaitables pour personne,
 - Le test final permet de vérifier que l'étanchéité à l'air n'a pas été dégradée par la suite des travaux, notamment les traversées de réseaux fluides,

En complément, l'autocontrôle par les entreprises est à encourager.

- ✓ On précisera qui paie les tests (de préférence du Maître d'ouvrage pour garder le choix du prestataire), et ce qui se passe si l'objectif n'est pas atteint (généralement la reprise des points faibles et nouveau test à la charge de l'entreprise),
- ✓ **Expliciter les solutions retenues et les produits souhaités** : membranes, adhésifs, manchettes, colles, etc. Utiliser des gammes de produits compatibles (typiquement adhésif et freine vapeur de la même marque)...

❖ Points de vigilance

Au niveau de la Toiture



Faux plafond avec suspentes : pose d'un freine-vapeur impossible



Solution : contre lattage sous l'ossature primaire, sur lequel seront fixées les suspentes

- ✗ Il est impératif de prévoir un freine-vapeur ou pare-vapeur continu au niveau de la toiture : le recours au kraft des isolants ne peut que conduire à un résultat catastrophique : les liaisons entre lés sont quasiment impossibles à réaliser en pratique. On rappelle de plus que ce kraft ne constitue pas un pare-vapeur au sens des DTU. Ils ne font que concentrer les problèmes de migration de vapeur d'eau.
- ✗ **En présence de faux plafonds**, bien réfléchir à la position du freine-vapeur ou pare-vapeur. La pose de cette membrane est **impossible entre suspentes**.
- ✓ Solution : prendre le freine vapeur en sandwich sous l'ossature primaire, avec un contre lattage sur lequel on pourra fixer les suspentes sans dégrader l'étanchéité à l'air (photo ci-dessus).

NB : si on choisit d'isoler sur le faux plafond en complément d'une isolation dans l'ossature primaire ou au-dessus, il convient de respecter la règle des 1/3 – 2/3 (voir précédemment la partie sur la migration de la vapeur d'eau).

- ✗ Attention aux détails impliquant un bac acier : voir précédemment la difficulté pour positionner le pare vapeur en évitant les suspentes, et dans le cas d'un pare vapeur déroulé sur bac acier, attention aux arrêtes coupantes qui déchirent la membrane.



*Raccord des freine-vapeur entre toiture et murs.
Les tasseaux permettent de conserver une lame
d'air pour passer l'électricité.*

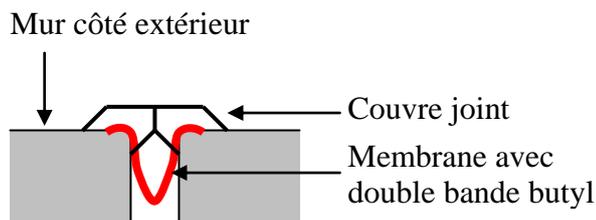


*Produit permettant d'assurer l'étanchéité à l'air et
la garde au feu pour un conduit de fumée*

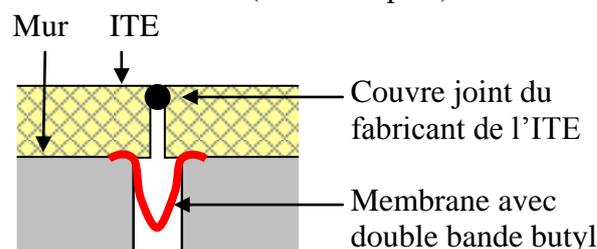
- ✓ Assurer la jonction entre la toiture et les murs.
- ✓ Créer un **vide technique** entre la membrane d'étanchéité à l'air et le parement, pour le passage de l'électricité et la pose des boîtes de connexion de l'éclairage.
- ✓ Prévoir des manchettes pour la **traversée des réseaux fluides** (ventilation primaire des évacuations,...) et des adhésifs pour les plus gros réseaux comme la ventilation.
- ✓ Prévoir une pièce d'étanchéité spécifique pour le passage des **conduits de fumée**, afin de respecter à la fois la garde au feu et l'étanchéité à l'air (photo ci-dessus).
- ✓ Décrire des **trappes d'accès aux combles étanches à l'air** (avec un joint périphérique continu).
- ✓ Sélectionner des **ouvrants de désenfumage** et **lanterneaux d'éclairage naturel** étanches à l'air (en tout cas le plus étanches possibles... sur les opérations suivies en Bourgogne tous les ouvrants de désenfumages ont présenté des fuites importantes lors des tests d'infiltrométrie, soit par défaut de continuité des joint, soit par compression insuffisante de ceux-ci)

Au niveau des murs

- ✓ L'étanchéité à l'air des murs béton ne pose pas de problème particulier en partie courante.
- ✗ En revanche ne pas oublier de traiter les joints de dilatation : prévoir une membrane faisant une ondulation dans l'épaisseur du JD, permettant à celui-ci de travailler (détail ci-après).



Traitement du joint de dilatation : Mur isolé par l'intérieur



Mur isolé par l'extérieur

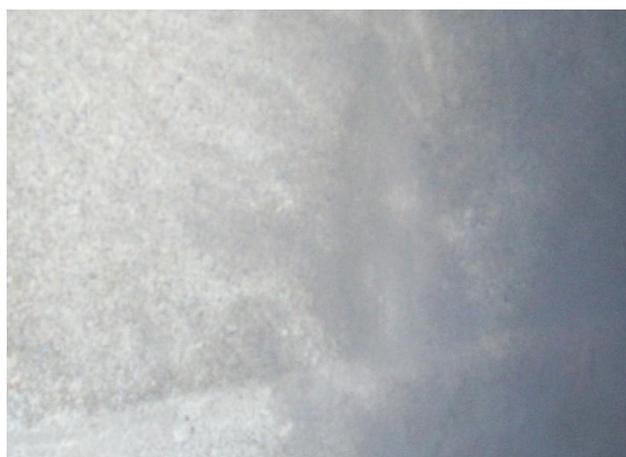
- ✓ Les quatre faces du joint de dilatation doivent être traitées (murs, toiture, et plancher bas)



Etanchéité à l'air d'un joint de dilatation par la pose d'une membrane



Etanchéité à l'air en cours sur l'acrotère au niveau d'un joint de dilatation (hors AAP).



Fumée traversant un mur en agglo non enduit pendant un test d'infiltrométrie (hors AAP)



Etanchéité à l'air d'un mur à ossature bois réalisé par les panneaux OSB.

- ✗ **Attention les agglo sont poreux même en partie courante** (voir photo ci-dessus). Il ne suffit pas de réaliser des bons joints, **un enduit est nécessaire sur toute la surface.**

- ✓ Dans le cas des murs à ossature bois, c'est généralement une membrane qui assure l'étanchéité à l'air. Préférer un freine-vapeur hygrovariable adapté. Les lés doivent être raccordés entre eux par un adhésif adapté.
- ✓ Pour les murs à ossature bois, il est aussi possible d'utiliser les panneaux de contreventement intérieurs (OSB), qui doivent alors être soigneusement raccordés avec un adhésif adapté (photo ci-dessus).
- ✓ Les **fourreaux électriques** traversant la frontière d'étanchéité à l'air (éclairage extérieur, alimentation de volets roulants électriques, etc.) doivent être traités, à la fois autour du fourreau, et entre le fourreau et les conducteurs (schéma et photo ci-après).

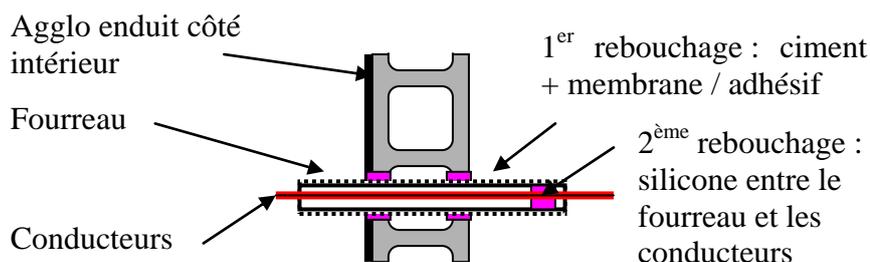
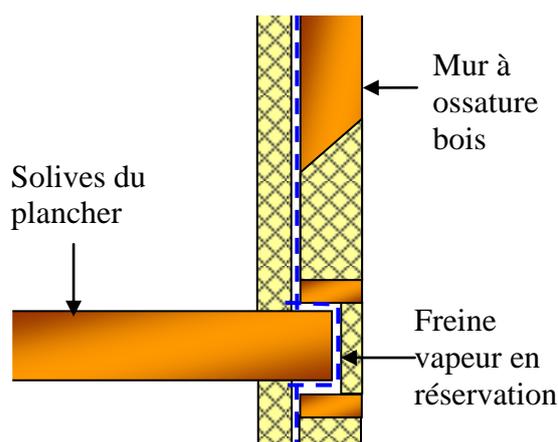


Schéma du traitement de l'étanchéité à l'air au passage d'un fourreau électrique

Manchette pour le passage d'un fourreau électrique sur mur à ossature bois.

- * **En ossature bois, attention à la continuité de l'étanchéité à l'air au niveau des planchers intermédiaires légers.**
- ✓ Prévoir un freine vapeur en réservation en nez de plancher (voir photo et schéma ci-dessous).



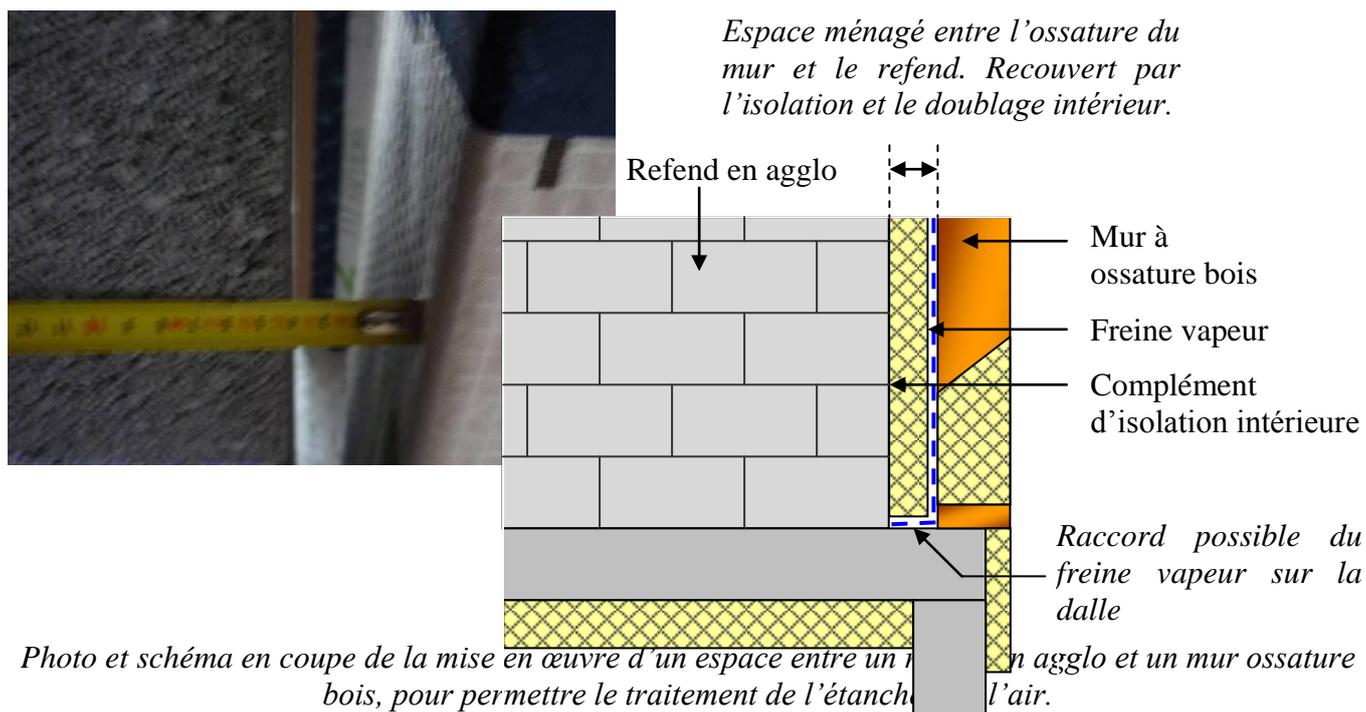
Freine-vapeur en réservation au nez du plancher intermédiaire

Principe de réalisation : un freine vapeur est posé sur la lisse du mur inférieur avant pose du plancher, et retourné à l'intérieur avant pose du mur supérieur. Ainsi il ne reste qu'à raccorder ce freine vapeur en réservation avec le freine vapeur des murs courants.

NB : cette solution est préconisée dans le DTU 31.2 concernant les murs à ossature bois, annexe 3 § 3.2.

✘ Attention également à la **liaison entre un refend et un mur ossature bois** : dans certains cas la continuité de l'étanchéité à l'air n'est pas possible sur le chantier, soit au niveau du mur, soit pour la liaison avec la dalle. On peut apporter les solutions suivantes :

- Si le refend est en béton : il suffit de raccorder le freine-vapeur sur le béton avec un adhésif ou une colle adaptée.
- Dans le cas d'un refend en ossature bois, prévoir un lé de freine vapeur en réservation (détail ci-dessus pour le plancher intermédiaire, à adapter en vue en plan). Attention, bien anticiper également le raccord avec la dalle et la toiture.
- Si le refend est en agglo, donc non étanche à l'air à l'intérieur, un espace doit être ménagé pour permettre la pose continue du freine vapeur (voir photo et schéma ci-dessous). Cet espace pourra être recouvert (et rendu coupe-feu si nécessaire) par le doublage intérieur.



Au niveau des menuiseries

- ✓ Pour l'étanchéité à l'air entre ouvrant et dormant, on choisira des **menuiseries classées A4** (voir § 2.2.5).
- ✗ Une attention particulière doit être apportée aux **seuils de portes et de portes-fenêtres**. En effet, on constate souvent d'importantes fuites à cet endroit (photo ci-dessous).



Fuites importantes au niveau du seuil d'une porte-fenêtre

- ✓ Des solutions existent pour assurer l'étanchéité à l'air tout en préservant l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite (PMR) :
 - Seuils « suisses » à joint de faible hauteur (< 2cm),
 - Pour conserver un sol fini parfaitement plat : plinthe mobile avec joint d'étanchéité (type Klomatic, seuil Dual, etc...)



Ci-contre : exemple de seuil suisse sur menuiserie alu (hors AAP)



Ci-contre : exemple de plinthe mobile

NB : dans les deux cas, veiller à la mise en œuvre rigoureuse (alignement des joints du seuil suisse avec les joints du dormant pour une bonne compression, continuité entre seuil mobile et dormant...).

- ✓ Pour la **liaison entre dormant de menuiserie et bâti**, les meilleurs résultats constatés dans le cadre des Appels à Projets ont été réalisés avec des membranes d'étanchéité, pourvues de bande butyl si le support le nécessite.
- ✓ Il est possible d'obtenir une bonne étanchéité avec des mousses à cellules fermées de forte largeur (type Illmod Trio, Iso Bloco One, etc.), mais leur mise en œuvre est plus difficile (notamment dans les angles) et ces produits ne laissent aucune tolérance sur la planéité et les cotes du bâti

(l'expansion de la mousse doit être dans les plages de tolérance prévues dans la documentation technique, sinon il y a des fuites).



Pose d'une membrane d'étanchéité avec bande butyl sur béton ou agglo enduit



Raccord entre freine-vapeur et dormant par un adhésif adapté



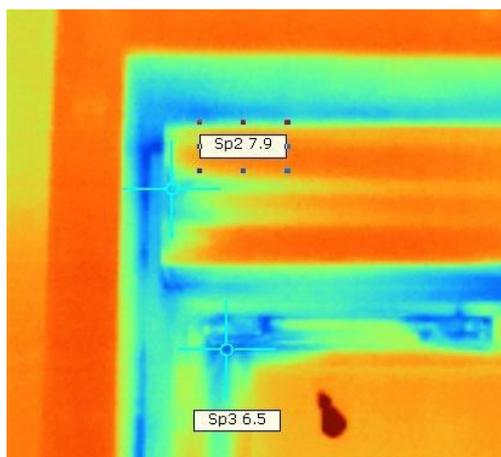
Menuiserie en applique intérieure : les équerres gênent la pose de la membrane (hors AAP)

- ✘ Dans le cas des membranes, il est important d'anticiper le mode de pose des menuiseries, et d'**éviter la superposition des équerres et de la membrane** (photo ci-dessus). La réalisation d'un carnet de détail doit permettre d'anticiper ce type de problème.
- ✓ C'est pourquoi il est très important de **déterminer suffisamment en amont du projet le mode de pose des fenêtres (dès l'APS)**, qui impacte à la fois les ponts thermiques et les solutions d'étanchéité à l'air.

Exemples de solutions d'étanchéité à l'air, selon la position des menuiseries

Applique intérieure	Tunnel	Applique extérieure
<p><i>Raccord du freine vapeur sur le dormant (ici avec une feuillure à parement sur le dormant). Assurer l'étanchéité à l'air et au vent par un compriband.</i></p>		<p><i>Pose de la membrane côté intérieur pour éviter le chevauchement avec les équerres ou le précadre</i></p>
<p><i>Certaines membranes (résistantes à la pluie et aux UV) peuvent être posées côté extérieur sous le retour d'ITE.</i></p>	<p><i>Idem détail précédent. Autre solution : Pose côté intérieur à plat sous un profil d'habillage, ou encore mousse fermée de forte largeur...</i></p>	<p><i>Membrane sous le parement des tableaux. Autre solution avec membrane extra-large recouvrant les équerres (symétrique du détail en ITI et pose intérieure)</i></p>

- ✘ **Attention aux coffres de volets roulants.** Les coffres en saillie intérieure sont à proscrire, car ils génèrent systématiquement des fuites importantes.
- ✓ Préférer les coffres de volet roulant extérieurs, soit monoblocs, soit les coffres « Y » indépendants, à poser en linteau.
- ✓ Privilégier si possible les commandes électriques filaire (attention aux consommations de veilles des récepteurs de télécommande).



Thermographie infrarouge d'un coffre de volet roulant PVC pendant un test d'infiltrométrie (entrées d'air bouchées) : on voit en bleu des fuites importantes. (hors AAP)



Menuiserie monobloc avec coffre de volet roulant extérieur (avant raccordement des membranes et pose de l'ITE) (hors AAP)



Coffre de volet roulant extérieur, avant ITE.

- ✓ D'autres occultations que les volets roulants sont possibles, et posent moins de problèmes d'étanchéité à l'air ! Par exemple les volets battants, coulissants, ou encore les brise soleil orientables.



Brise soleil orientable (BSO) en cours de chantier.



Volet coulissant sur maison à ossature bois.

Au niveau du plancher bas

- ✓ En construction neuve, l'étanchéité à l'air courante est assurée généralement par une dalle béton.
- ✗ En neuf comme en rénovation, attention aux planchers (bas et intermédiaires) en **poutrelle-hourdis** : les hourdis sont creux et constituent une « autoroute à courant d'air » : l'air peut passer par différents trous (passage de réseau de chauffage par exemple, ou percements pour fourreaux électrique), circuler dans les hourdis, et atteindre l'extérieur en façade ou en sous face.
- ✓ Solution : traiter l'étanchéité en périphérie avec un enduit ciment, ainsi qu'en sous-face dans le cas où des réseaux traversent la dalle.
- ✗ En rénovation particulièrement, vérifier la présence d'enduit au niveau des débords de dalles à l'extérieur : balcons, occultations extérieures sous débord de dalle,... (voir photo ci-dessous).



Débord de dalle hourdi non enduit au niveau des volets roulants extérieurs : défaut d'étanchéité à l'air majeur. Un enduit a été réalisé. (hors AAP)

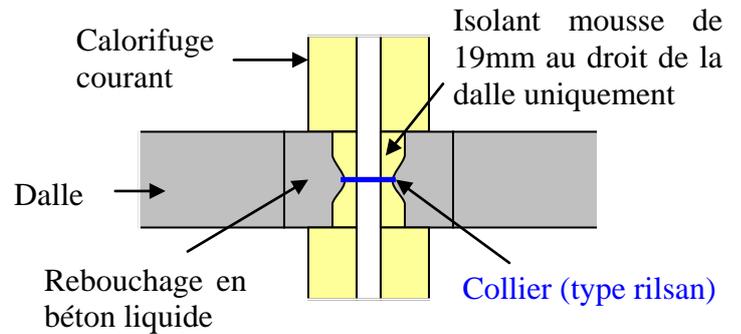


Balcon en poutrelle hourdis scié pendant la rénovation : défaut d'étanchéité à l'air majeur. Un enduit ciment a été réalisé. (hors AAP)

- ✓ Les **liaisons périphériques entre la dalle et les murs** est à réaliser, notamment en présence d'un freine-vapeur, qui sera raccordé à la dalle (plutôt qu'à la chape, le cas échéant) par un adhésif ou une colle adaptée.
- ✓ Les traversées de réseaux fluides sont traités avec des adhésifs, adhésif étirable, manchettes, etc. (photo ci-dessous).
- ✓ Dans le cas des réseaux isolés, on peut soit utiliser ces adhésifs ou manchette, **raccordés sur le conduit lui-même et non sur l'isolant** (qui reste poreux), soit prévoir un isolant de type mousse, compressé au droit du milieu de dalle par un collier type rilsan (détail ci-dessous).



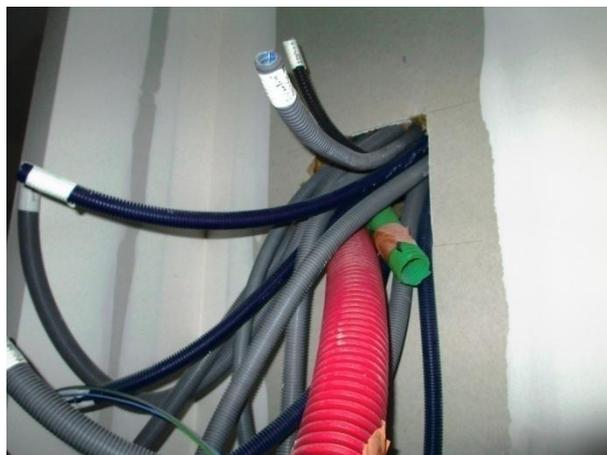
Etanchéité à l'air au niveau des traversées de réseaux fluides par adhésif étirable.



Détail pour réseau isolé avec mousse expansée et collier rilsan dans l'épaisseur de la dalle.

- ✓ On souligne que l'amélioration de l'étanchéité à l'air des traversées de dalle contribue également à une bonne isolation phonique entre niveaux.

- ✖ Il est très difficile de rendre étanche à l'air un faisceau de fourreaux électriques partant d'un TGBT ou d'un tableau électrique de logement. C'est pourquoi il est largement préférable de prévoir ces **tableaux électriques dans le volume chauffé et étanche à l'air** dès la conception. Il ne reste alors à rendre étanche à l'air que les alimentations générales.



Ci-contre : fourreaux en attente pour la pose du tableau électrique d'un logement.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse - Etanchéité à l'air			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Neuf	Ne pas se contenter du kraft sur l'isolant. Ne pas improviser sur le chantier. Bannir le « scotch orange » !	Q4 selon RT2012 (expliciter l'objectif dans le DCE) Réaliser un carnet de détails.	Passif : n50 = 0,6 vol/h sous 50 Pa.
Réhabilitation		Réflexion sur la migration de vapeur d'eau couplée à l'étanchéité à l'air. n50 inférieur à 3 vol/h	n50 inférieur à 1 vol/h

❖ Pour aller plus loin

- DVD et guide sur l'étanchéité à l'air :

Production : Conseil Régionaux Alsace, Bourgogne, Franche-Comté, Pays de la Loire, et ADEME.

Réalisation : Wigwam Conseil, Monochrome, avec la participation d'Alsatech, Afordex, et Odysseus Film Production.

ÉTANCHÉITÉ À L'AIR des bâtiments

DVD + guide à l'usage des professionnels

- Fiche technique sur l'étanchéité à l'air réalisée par Enertech pour la MAF (Mutuelle des Architectes Français), disponible sur www.enertech.fr
- Fiche technique sur la migration de vapeur d'eau et la prévention des pathologies réalisée par Enertech pour la MAF, disponible sur www.enertech.fr
- DTU et CPT (e-cahier du CSTB) : à télécharger ou commander sur www.cstb.fr
- Avis techniques des fabricants (notamment pour les freine vapeur hygrovariables) : sur www.cstb.fr ou sur le site du fabricant.

2.2.7 Les particularités de la Rénovation

❖ Objectifs de l'appel à projet

Dans un objectif de simplicité et de massification de la rénovation, les objectifs des Appels à Projets sont des **obligations de moyens**.

Ces niveaux d'isolation ont été calculés par Enertech par 4400 simulations thermiques dynamiques, pour diviser par 4 les consommations de chauffage du parc français de logements existants, c'est à dire atteindre une consommation de 50 kW.h/m².an **en moyenne** sur la France.

L'idée de départ est qu'il ne sera pas possible de réaliser une étude thermique poussée (simulation dynamique) sur tous les logements à rénover en France, notamment sur les maisons individuelles. D'où la proposition d'obligations de moyens, pour :

- ✓ Simplifier la conception et éviter des études coûteuses qui aboutissent toujours plus ou moins au même résultat (la différence d'isolation entre un mur en béton et un mur en pierre, par exemple, étant négligeable devant l'isolation à apporter),
- ✓ Standardiser les solutions pour réduire les coûts,
- ✓ Assurer la péréquation des coûts de rénovation sur toute la France métropolitaine (éviter que la rénovation ne coûte plus cher aux ménages dans le Nord que dans le Sud).

Il est important de souligner que les obligations de moyens définissent des résistances thermiques à apporter aux différentes parois, **mais laissent toute liberté dans le choix des isolants**. Il reste de la compétence et de la responsabilité du sachant (ici les Maîtres d'œuvre) d'adapter la nature des isolants aux typologies de bâtiments existants, notamment pour s'assurer de la maîtrise des flux de vapeur d'eau.

Ci-contre : ITE sur ossature bois d'une des premières rénovations massives facteur 4 (100 logements), lauréate de l'Appel à Projets 2006.



Les obligations de moyens des Appels à Projets étaient donc les suivants :

- ✓ Isolation R=4,3 m².K/W des murs extérieurs et plancher bas,
- ✓ Isolation R=7,5 m².K/W de la toiture,
- ✓ Menuiseries Triple vitrage si Isolation Thermique des murs par l'Intérieur (ITI), Double vitrage si Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE),
- ✓ Ventilation double flux avec récupération de chaleur (>70%),
- ✓ Remplacement de chaudière, énergie renouvelable pour Chauffage et/ou ECS, régulation terminale performante
- ✓ Actions de Maîtrise de la demande d'électricité :
 - en logement fourniture de LBC, prise commandée du poste audio-visuel,
 - en logement collectif (communs) et tertiaire : luminaires à tubes T5 et ballast électronique, haut rendement optique, détection de présence, ascenseur performant,
- ✓ Matériel hydro-économe : limiteurs de débit autorégulés, douchettes économes, limiteurs de pression à l'entrée des logements.

Par ailleurs il était prévu 2 tests d'infiltrométrie obligatoires. Pas d'objectif précis en 2006 et 2007, objectif indicatif de 1 vol/h en 2008 et maximum de 3 vol/h obligatoire.

On souligne que cette obligation de moyen unique a été actualisée par Enertech depuis les Appels à Projets, et est remplacée aujourd'hui par un tableau de dix bouquets de travaux, ou « **Solutions Techniques de Référence** » (STR), qui laissent plus de souplesse pour adapter la rénovation à l'état existant :

Isolation Int / Ext	Plancher bas R add [m².K/W]	Etanchéité à l'air : n ₅₀	Ventilation	Menuiseries U [W/m².K]	Murs	Toiture
					R add [m².K/W]	
Intérieure	3	1 vol/h	Double flux	Double 1,4	4,5	7,5
	4,5	3 vol/h	Double flux	Triple 1,1	6	10
		3 vol/h	Double flux	Triple 0,8	4,5	10
		1 vol/h	Double flux	Double 1,7	4,5	10
Extérieure	3	3 vol/h	Double flux	Double 1,4	4,5	7,5
		1 vol/h	Double flux	Double 1,7	4,5	7,5
			Double flux	Double 1,4	3,7	7,5
			Hygro	Triple 1,1	4,5	7,5
	4,5	3 vol/h	Double flux	Double 1,7	4,5	7,5
			Hygro	Triple 0,8	6	10

Système de chauffage :
- Chaudière Gaz ou Fioul à condensation,
- Bois : chaudière à haut rendement et faibles émissions de particules,
- Pompe à chaleur avec COP annuel supérieur à 3 (sur air extrait ou géothermique).
Régulation terminale performante : ad minima un thermostat par logement pilotant la chaudière et robinets thermostatiques sur les radiateurs.

Tableau des 10 Solutions Techniques de Référence pour la rénovation « facteur 4 » des bâtiments de logements (version avril 2015).

❖ *Points de vigilance*

- ✓ Détection des pathologies liées à l'humidité (remontées capillaires, défauts d'étanchéité,...).
- ✓ **Gestion de la migration de la vapeur d'eau.** (voir § 2.2.6) : il est indispensable de vérifier l'impact de l'ajout d'isolants sur le cheminement de la vapeur dans les parois. L'analyse de la migration de vapeur est un des aspects les plus importants de la rénovation, mais il est rarement abordé de façon systématique. Cet aspect doit être pris en compte notamment dans le choix des isolants (perméables ou non à la vapeur d'eau), des membranes (pare ou freine vapeur), et des enduits sur ITE (plus ou moins ouverts à la migration de vapeur d'eau).
- ✓ La présence d'amiante est à intégrer le plus tôt possible dans la conception, car elle peut rendre impossible en pratique certains travaux.
- ✓ Le **confort d'été** est également un sujet à aborder rapidement. Certains bâtiments anciens sont très vitrés, notamment des bâtiments d'enseignement. Il est possible d'apporter des solutions pour améliorer le confort d'été sans dégrader l'éclairage naturel (relever les allèges, réduire les surfaces vitrées côté couloir, ajouter des occultations extérieures, etc.).

❖ *Pour aller plus loin*

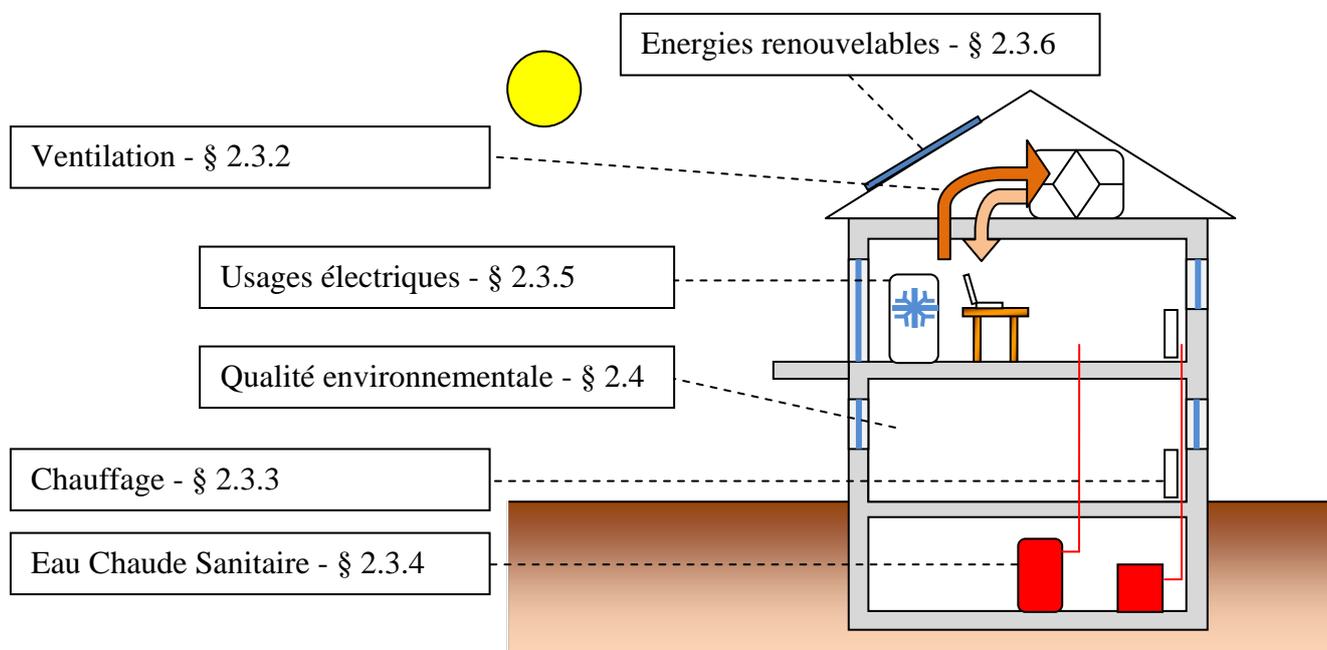
- *Enjeux de la rénovation, Solutions Techniques de Référence : documents disponibles sur le site www.enertech.fr*

2.3 La conception des lots fluides

❖ Définition

Le terme de « Fluides » recouvre la gestion et le traitement de l'air, de l'eau, et de l'énergie. En pratique, il s'agit des lots chauffage, ventilation, plomberie, équipements sanitaires, électricité, et ascenseurs.

Présentation synthétique de la conception des bâtiments basse consommation, pour les lots fluides :



Solutions techniques fréquemment observées dans les Appels à Projets :

Objectif	Rénovation facteur 4	BBC / RT 2012	Passif / Energie Positive
1. Ventilation	Double flux / Simple flux hygroréglable	Double flux / Simple flux hygroréglable	Double flux
2. Chauffage	Réduction de la puissance, condensation, régulation...	Chaudière Gaz à condensation, Pompe à chaleur,...	Pompe à chaleur géothermique, chaudière bois,...
3. ECS	Matériel hydro-économe, calorifuges...	Matériel hydro-économe Logement : solaire appoint gaz, ballon thermodynamique, ballon raccordé à la génération bois, bouclage sur-isolé... Tertiaire : petits ballons électriques sur-isolés, sans bouclage.	
4. Usages électriques	Fourniture de lampes basse consommation	LBC, tubes T5, luminaires à haut rendement optique, détection de présence...	Idem + travail sur tous les usages : gestion des veilles, froid performant, cuisson, bureautique, ascenseurs...
5. EnR	Selon faisabilité	ECS solaire, récupération de chaleur sur eaux grises,...	Bois, solaire thermique, photovoltaïque,...

NB : ce tableau ne constitue pas des recommandations de conception, mais plutôt une synthèse des solutions les plus fréquentes sur les opérations des Appels à Projets.

2.3.1 Un travail d'équipe entre BE et Architecte

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Dès l'Esquisse	Toute l'équipe, surtout Architecte et BET	Taille et alignement des gaines techniques, taille des locaux techniques, anticiper la maintenance

❖ *Enjeux*

L'approche la moins chère, la plus performante et la plus robuste en termes de maintenance passe nécessairement par un **travail collectif de la Maîtrise d'œuvre** dès les premiers stades de la conception.

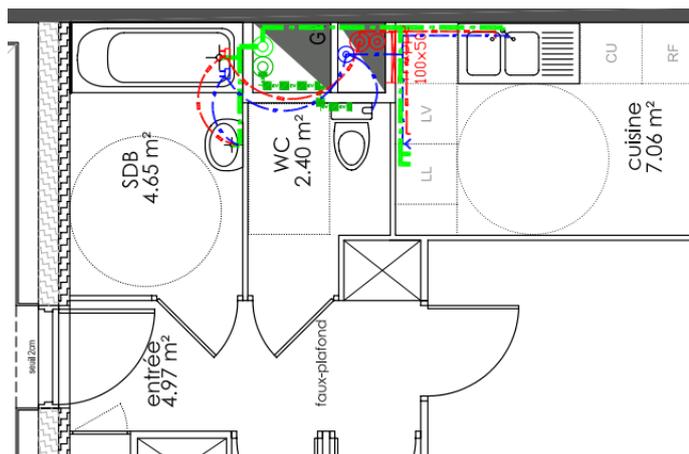
Dès l'esquisse, les contraintes parfois lourdes des lots techniques doivent être intégrées au projet architectural. On peut ainsi aboutir ensemble à une intégration élégante des éléments techniques, des réseaux courts qui fonctionnent bien et qui seront plus facile à entretenir.

Les enjeux énergétiques portent principalement sur les installations de ventilation, surtout si elle est double flux, et sur le réseau de bouclage d'eau chaude sanitaire (ECS). Les réseaux de chauffage hors volume chauffé (notamment enterrés) sont également des points assez sensibles.

❖ *Bonnes pratiques*

Sujets à aborder entre BE et architecte dès l'APS, voire l'Esquisse :

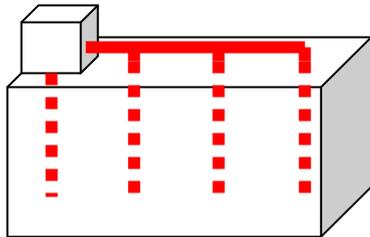
- ✓ En logement : disposition des pièces humides, position des gaines techniques (palières, en logement, gaine unique) et dimensions des gaines. Objectifs :
 - **Regrouper les pièces humides à proximité des gaines** (en logement), pour limiter la longueur de la distribution ECS terminale.
 - Idéalement, on peut arriver à une **gaine unique par logement**, ce qui constitue un gain important sur l'économie du projet. On peut même mutualiser certains réseaux (notamment le bouclage) entre deux gaines logement accolées, afin de réduire les longueurs de bouclage (enjeu majeur, cf § 2.3.4).



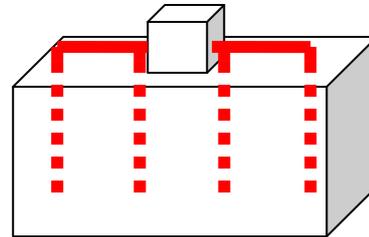
Exemple d'aménagement de logement avec gaine technique unique (hors AAP)

- Adapter la taille des gaines aux systèmes prévus, notamment au type de ventilation. Le BET doit **pré-dimensionner les colonnes de ventilation** dès l'APS pour préciser ses besoins à l'architecte.
- ✓ En tertiaire également, pré-dimensionner les réseaux de ventilation, pour s'assurer qu'ils passent dans les faux-plafonds prévus. Ceci doit être fait avant de figer l'altimétrie des niveaux.
- ✓ **En maison individuelle : proscrire le bouclage** : regrouper les pièces humides à proximité de la génération d'ECS.

- ✓ En tertiaire : éviter à tout prix le bouclage (sauf cuisines collectives ou autres usages particuliers...), regrouper les points de puisage pour mutualiser les ballons ECS (réduction des pertes de stockage).
- ✓ Bien positionner et dimensionner les **locaux techniques** :
 - Ces locaux doivent occuper une position centrale dans le bâtiment, pour permettre des réseaux en étoile, qui réduisent fortement les pertes de charges, et également les coûts (diamètres plus faibles).

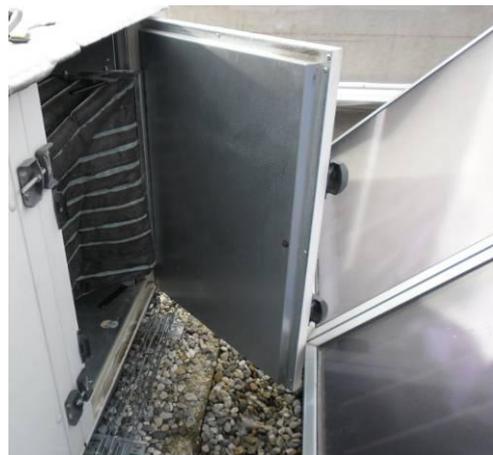


Local technique centré : réseau commun de fort diamètre, plus de pertes de charges.



Local technique centré : diamètres réduits, pertes de charges diminuées, donc consommations électrique réduites (pompes ou ventilateurs)

- Veiller à **minimiser la longueur des réseaux** de chauffage, ECS, et ventilation double flux hors volume chauffé : on réduit ainsi les pertes thermiques.
- **Penser la maintenance dès la conception.** Il apparaît aujourd'hui, notamment suite aux retours des visites de « Mise au point », que ce point est absolument essentiel. Il est encore trop souvent négligé, ce qui rend la maintenance très difficile (comme l'illustrent les photos ci-dessous), donc très chère.



A contrario, prévoir des locaux techniques bien dimensionnés, avec la place nécessaire autour des équipements (notamment pour sortir les filtres des Centrales de Traitement d'Air (CTA), accéder aux ballons,...), prévoir un accès de plain pied au local CTA,... Toutes ces mesures permettent une maintenance aisée, donc de qualité et peu chère.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Travail d'équipe entre Architecte et BET fluides			
	A proscrire	Minimum	Optimal

Neuf	Bouclage en maison individuelle	Distribution ECS terminale courte	Gaine unique logement Locaux techniques centrés, réseaux en étoile
Réhabilitation	Filtres inaccessibles	Locaux techniques bien dimensionnés	Local CTA accessible de plain pied

2.3.2 Ventilation

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Esq. à DCE	BET fluides	Performance thermique, étanchéité des réseaux, acoustique, qualité de l'air intérieur

❖ Enjeux

La ventilation est un sujet très important, au croisement de plusieurs enjeux du bâtiment :

- ✓ La **qualité de l'air** : la fonction fondamentale de la ventilation est de renouveler l'air pour évacuer l'humidité, le CO₂ et les polluants de façon générale.
- ✓ La **performance thermique** : l'enjeu de la ventilation en termes de besoins de chauffage est d'environ **20 kW.h/m² (logement) à 40 kW.h/m² (bureaux)** et même plus pour les bâtiments d'enseignement. C'est donc un enjeu considérable au regard des objectifs de performance des bâtiments actuels et de la rénovation facteur 4 (où l'on vise 50 kW.h/m² de consommation de chauffage).
- ✓ La **consommation d'électricité** des installations de ventilation constitue également un poste qui peut s'avérer important, et qu'il convient de minimiser.
- ✓ Enfin la ventilation est un enjeu important pour l'**acoustique** des bâtiments, à la fois l'acoustique extérieure (entrées d'air) et intérieure (bruit des équipements, interphonie).

Qualité de l'air intérieur (QAI)

La fonction fondamentale d'un bâtiment est de fournir à ses occupants un espace à l'abri de la pluie, du vent et du froid. Aujourd'hui, cette **fonction protectrice du bâtiment** s'étend également à la protection de ses occupants contre les pollutions extérieures et intérieures.

Il est paradoxal que l'on se préoccupe souvent plus de la qualité de ce que l'on mange que de la qualité de l'air qu'on respire. Pourtant l'intestin est une barrière, qui filtre ce qui passe dans le sang, alors que les poumons sont un échangeur très ouvert.

C'est pourquoi la question de la qualité de l'air fait à présent l'objet d'une réglementation avec obligation de résultats dans les bâtiments recevant du public (ERP). C'est le Décret n°2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public. Ce texte instaure de manière progressive l'obligation de surveiller périodiquement la qualité de l'air intérieur dans les ERP, obligation qui devra être satisfaite :

- ✓ avant le 1^{er} janvier 2015 pour les établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de six ans et les écoles maternelles ;
- ✓ avant le 1^{er} janvier 2018 pour les écoles élémentaires ;

- ✓ avant le 1^{er} janvier 2020 pour les accueils de loisirs et les établissements d'enseignement du second degré ;
- ✓ avant le 1^{er} janvier 2023 pour les autres établissements.

Les objectifs sont les suivants :

Substance	Valeur guide ⁶		Seuil pour les ERP ⁷	
Formaldéhyde	50 µg/m ³ : « valeur d'informations et de recommandations » définie par le Haut Conseil de la Santé Publique en 2009	30 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2015	10 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2023	Concentration 100 µg/m ³
Benzène	5 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2013	2 µg/m ³ pour une exposition de longue durée à compter du 1 ^{er} janvier 2013		Concentration 10 µg/m ³
Dioxyde de carbone	Règlement sanitaire départemental type ⁸			Pics de concentration supérieurs à 4 000 ppm, et valeur moyenne en période d'occupation supérieure à 2 000 ppm
	1 000 ppm, avec tolérance de 1 300 ppm dans les locaux où il est interdit de fumer			

Il est important de souligner le fait que l'émission de polluants comme le formaldéhyde et le benzène est permanente (liée aux matériaux de construction et d'aménagement), et ne dépend pas de la présence humaine. Afin de l'évacuer, il faut donc un débit d'air permanent dans les logements. En tertiaire, si on arrête la ventilation la nuit et le week-end, il faut prévoir de renouveler l'air totalement avant l'arrivée des occupants.

Débits réglementaires et renouvellement d'air conseillé

Pour les logements, les débits de ventilation sont définis dans **l'arrêté du 24 mars 1982**, modifié par l'arrêté du 28 novembre 1983. L'arrêté de 1982 prévoit un débit de base de ventilation permanente, et un débit de pointe que l'utilisateur peut déclencher pour la cuisine. L'arrêté de 1983 introduit la possibilité de faire varier le débit (ventilation hygroréglable), et ajoute un débit minimum en inoccupation.

⁶ : Décret no 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène. Valeur cohérentes avec les recommandations du Haut Conseil de la Santé Publique, en 2009, et celles de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset), en 2007.

⁷ : Valeur pour laquelle des investigations complémentaires doivent être menées et pour laquelle le préfet de département du lieu d'implantation de l'établissement doit être informé ; Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.

⁸ : RSDT, circulaire du 9 août 1978.

Nombre de pièces principales du logement	Débits extraits exprimés en m ³ /h				
	Cuisine	Salle de bains ou de douches commune ou non avec un cabinet d'aisances	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisances	
				Unique	Multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

Extrait de l'arrêté de 1982 définissant les débits « de pointe » réglementaires de ventilation en logement.

Nombre de pièces principales	1	2	3	4	5	6	7
Débit total minimal en m ³ /h	35	60	75	90	105	120	135
Débit minimal en cuisine en m ³ /h	20	30	45	45	45	45	45

Extrait de l'arrêté de 1982 : débits « de base » réglementaires de ventilation en logement.

Nombre de pièces principales	1	2	3	4	5	6	7
Débit total minimal en m ³ /h	10	10	15	20	25	30	35

Débit total minimal dans le cas de la ventilation hygroréglable (article 4 modifié par arrêté du 28 octobre 1983)

Pour les bâtiments tertiaires, on distingue les bâtiments recevant des travailleurs (ERT), pour lesquels le **code du travail** (article R.4222-6) fixe les débits minimaux d'air neuf par occupant. À titre d'exemple, ce débit est de 25 m³/h par personne dans les bureaux. Pour les autres bâtiments tertiaires, comme les maternelles, bâtiments d'enseignement, salles de spectacle ou de sport, etc. les valeurs de débit « normal » d'air neuf à respecter sont fixées par l'article 64 du **Règlement Sanitaire Départemental Type**. À titre d'exemple, le débit dans les maternelles, les écoles et les collèges est fixé à 15 m³/h par personne, et celui des lycées et des locaux universitaires à 18 m³/h par personne (on peut d'ailleurs noter que cette différenciation n'est pas très logique, dans la mesure où les enfants en bas âge sont bien plus sensibles que les adultes à la qualité de l'air et aux problèmes respiratoires).

DESIGNATION DES LOCAUX	DEBIT MINIMAL d'air neuf par occupant
Bureaux, locaux sans travail physique	25 m ³ /h
Locaux de restauration, locaux de vente, locaux de réunion	30 m ³ /h
Ateliers et locaux avec travail physique léger	45 m ³ /h
Autres ateliers et locaux	60 m ³ /h

Débits réglementaires pour les bâtiments relevant du code du travail⁹

⁹ Code du travail, Article R4222-6 créé par Décret n° 2008-244 du 7 mars 2008

Destination des locaux	Débit minimal d'air neuf en mètres cubes/heure et par occupant (air à 1,2 kg/m ³)	
	Locaux avec interdiction de fumer	Locaux sans interdiction de fumer
Locaux d'enseignement :		
Classes, salles d'études, laboratoire (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique) : Maternelles, primaires et secondaires du 1 ^{er} cycle	15	-
Secondaires du 2 ^e cycle et universitaires	18	25
Ateliers	18	25
Locaux d'hébergement :		
Chambre collectives (plus de trois personnes) (1) , dortoir, cellules, salles de repos	18	25
Bureaux et locaux assimilés :		
Tels que locaux d'accueil, bibliothèques, bureaux de poste, banques	18	25
Locaux de réunions :		
Tels que salles de réunions, de spectacle, de culte, clubs, foyers	18	30
Locaux de vente :		
Tels que boutiques, supermarchés	22	30
Locaux de restauration :		
Cafés, bars, restaurants, cantines, salles à manger	22	30
Locaux à usage sportif :		
Par sportif :		
Dans une piscine	22	-
Dans les autres locaux	25	30
Par spectateur	18	30
1. Pour les chambres de moins de trois personnes, le débit minimal à prévoir est de 30 mètres cubes/heure par local		

Débits réglementaires pour les locaux à pollution non spécifique des bâtiments relevant du règlement sanitaire départemental type ¹⁰

¹⁰ Circulaire du 9 août 1978 modifiée relative à la révision du règlement sanitaire départemental (RSDT)

Destination des locaux	Débit minimal d'air neuf en mètres cubes/heure
Pièces à usage individuel :	
Salles de bains ou de douches	15 par local
Salles de bains ou de douches communes avec cabinets d'aisances	15 par local
Cabinets d'aisances	15
Pièces à usage collectifs	
Cabinet d'aisances isolé	30
Salle de bains ou douches isolée	45
Salle de bains ou de douches communes avec cabinet d'aisances	60
Bains, douches et cabinets d'aisances groupés	30 + 15 N *
Lavabos groupés	10 + 5 N *
Salle de lavage, séchage et repassage de linge	5 par mètre carré de surface de local (1)
Cuisines collectives	
Office relais	15/repas
Moins de 150 repas servis simultanément	25/repas
De 151 à 500 repas servis simultanément (2)	20/repas
De 501 à 1 500 repas servis simultanément (3)	15/repas
Plus de 1 500 repas servis simultanément	10/repas
N * Nombre d'équipement dans le local	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Compte tenu des contraintes techniques, les débits retenus seront de préférence arrondis au multiple supérieur de 15. 2. Avec un minimum de 3 750 mètres cubes/heure. 3. Avec un minimum de 10 000 mètres cubes/heure. 4. Avec un minimum de 22 500 mètres cubes/heure. 	

Débits réglementaires pour les locaux à pollution spécifique des bâtiments relevant du règlement sanitaire départemental type

Ces débits sont globalement prévus pour respecter une concentration de CO₂ comprise entre 1 000 et 1 300 ppm. En revanche, si on s'intéresse aux émissions de Formaldéhyde, il semble préférable de raisonner non pas en débit par personne, mais en renouvellement d'air (vol/h), qui reflète mieux le rapport entre le renouvellement d'air et la quantité de polluant émis.

Afin d'établir des ordres de grandeur, on peut se baser sur des mesures fournies par l'université de Berkeley (USA). Il apparaît que, compte tenu du niveau d'émission de formaldéhyde observé dans les logements américains (et en supposant que ce niveau est identique en France), une concentration de 50 µg/m³ (valeur cible la plus faible du tableau précédant) ne peut être maintenue en continu qu'avec un **taux de renouvellement d'air de 0,6 vol/h en permanence**¹¹.

Par chance, ce taux de renouvellement est atteint avec les débits de l'arrêté de 1982 pour les logements de type T1 et petits T2 (< 40m²). Pour les logements plus grands il serait nécessaire d'augmenter les débits en « surclassant » la bouche d'extraction en cuisine (par exemple prévoir pour les T3 la bouche prévue pour les T4).

En revanche, ce niveau de renouvellement d'air **n'est pas compatible avec la ventilation hygroréglable**, qui vise un renouvellement d'air autour de 0,3 à 0,4 vol/h.

¹¹ Formaldehyde as a basis for residential ventilation rates, de Sherman, M.H. et Hodgson, A.T. du Lawrence Berkeley National Laboratory, publié en 2002. L'étude établit qu'il faut un renouvellement de 0,5 vol/h pour atteindre 50 ppm de formaldéhyde. Pour atteindre 50 µg/m³ (soit 40,6 ppm), une règle de trois nous amène à 0,6 vol/h.

Solutions de ventilation et performances

Aération naturelle (par tirage thermique ou par ouverture des fenêtres) : l'aération constitue la solution de renouvellement d'air la plus simple, et elle ne consomme pas du tout d'électricité. Cependant les débits ne sont absolument pas régulés : le renouvellement d'air est insuffisant voire très insuffisant en l'absence de vent, et il peut être très important lorsqu'il y a du vent. Ce n'est donc pas une solution satisfaisante ni pour la qualité de l'air, ni pour la performance thermique.

Ci-contre : aération naturelle par conduit (hors AAP)



Extracteurs VNA en rénovation (hors AAP)

Ventilation naturelle assistée : ces systèmes de ventilation, particulièrement séduisants pour la rénovation de logements, permettent d'éviter l'insuffisance de débit de l'aération naturelle, et ce avec une consommation électrique très faible. En revanche rien n'empêche les sur-débits en cas de vent. L'analyse faite par Enertech sur la base de mesures réalisées par les fabricants montre que les débits sont supérieurs d'environ 30% au débit de base de l'arrêté de 1982, ce qui est très impactant sur le besoin de chauffage. Ce n'est donc pas une solution satisfaisante pour la performance énergétique.

Ventilation mécanique contrôlée simple flux autoréglable : la ventilation mécanique permet d'assurer un renouvellement d'air constant, calculé sur la base des débits réglementaires. Ce système présente l'intérêt d'une grande simplicité, y compris en maintenance (même si tout système de ventilation doit normalement subir une maintenance régulière¹², notamment des contrôles tous les ans pour les établissements recevant des travailleurs¹³ et pour les installations de VMC gaz¹⁴). Les débits sont corrects du point de vue de la qualité de l'air (avec les réserves énoncées précédemment).

Le défaut est l'absence de récupération de chaleur sur l'air extrait. Cette solution est donc incompatible avec une performance énergétique élevée dans le cas général.

On peut tout de même souligner qu'il est possible de réaliser des logements Passifs en ventilation simple flux autoréglable sur la côte méditerranéenne. Mais de façon générale, pour les débits plus importants du tertiaire, et pour tout type de logement partout ailleurs en France, il n'est pas possible d'atteindre le niveau de performance Passif sans récupérer la chaleur de l'air extrait.



¹² : RSDT, DTU 68.3 concernant les installations de ventilation mécanique

¹³ : Arrêté du 8 octobre 1987 relatif au contrôle périodique des installations d'aération et d'assainissement des locaux de travail

¹⁴ : Arrêté du 25 avril 1985 relatif à la vérification et à l'entretien des installations collectives de ventilation mécanique contrôlée - gaz.

On peut également souligner qu'il est possible de valoriser la chaleur de l'air extrait par une pompe à chaleur air-eau, assurant le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire. La difficulté technique est alors d'assurer un fonctionnement quasiment permanent de la PAC pour ne pas perdre de calories...



Ventilation mécanique contrôlée simple flux hygroréglable : ce système ingénieux permet de réduire les débits de ventilation lorsque les occupants sont absents de leur logement. Les bouches d'extraction (et les entrées d'air pour l'hygro B) sont sensibles à l'humidité dégagée par la présence humaine, et restent sur un débit minimal lorsque l'humidité est faible.

Le gain théorique annoncé dans les avis techniques est compris entre 40% et 56%, valeurs qui sont reprises dans le calcul réglementaire. Or ces valeurs sont basées sur un scénario d'occupation conventionnel, qui implique que les occupants ne sont pas présents dans leur logement la journée en semaine, ce qui est loin d'être toujours le cas en réalité. Lorsqu'on étudie des résultats de campagnes de mesures¹⁵ on constate souvent un gain nul par rapport aux débits de l'arrêté de 1982. Même si toutes les règles de l'art sont respectées, les résultats bruts de mesure montrent une économie en conditions réelles d'environ 20% à 40% par rapport aux débits de base de l'arrêté de 1982¹⁶. Le gain en performance énergétique est donc possible, sous réserve d'une bonne mise en œuvre, mais elle est loin d'être aussi importante que celle prise en compte dans le calcul réglementaire.

Concernant la qualité de l'air, l'absence des occupants ne signifie pas l'absence d'émission de polluants. Ce système implique donc que l'air, peu renouvelé en l'absence d'occupant, se charge en polluants. Au retour dans son logement on est donc accueilli par un air pollué, en attendant que l'ouverture des bouches ne l'évacue progressivement. Même si on raisonne en débit moyen, le taux de renouvellement d'air visé en ventilation hygroréglable est d'environ 0,3 à 0,4 vol/h, donc bien inférieur aux 0,6 vol/h nécessaires pour la qualité de l'air. Cette solution n'est donc pas satisfaisante du point de vue de la qualité de l'air.



Ventilation mécanique contrôlée double flux : la ventilation double flux avec récupération de chaleur reste le moyen le plus simple de récupérer la chaleur de l'air extrait. Cette récupération est assurée par un échangeur, qui peut être à plaques ou à roue, et qui réchauffe l'air soufflé avec l'air extrait (en hiver, sachant que l'inverse se produit en été). On peut ainsi récupérer plus de 85% de la chaleur de l'air extrait.

Ci-contre : Intérieur d'une centrale double flux : on voit ici le ventilateur d'extraction, le filtre d'air neuf et l'échangeur (à roue)

Les consommations électriques des ventilateurs sont normalement 2 à 3 fois plus élevées qu'en simple flux. Mais elles peuvent être réduites en sélectionnant les meilleurs ventilateurs et en optimisant les réseaux de ventilation (voir la suite). On peut alors abaisser la consommation à moins de 4 kW.h/m².an d'électricité (valeur mesurée).

¹⁵ : Campagne de mesure sur la ZAC Confluence à Lyon, réalisée par Enertech.

¹⁶ : Analyse des résultats bruts du programme Performance, rapport final publié en 2009, réalisé par Air-H en partenariat avec les fabricants de matériel de ventilation, le COSTIC, le CETIAT, et le CETE de Lyon. Le rapport conclut à la conformité des débits mesurés aux avis techniques, mais seulement après correction des résultats bruts pour passer de l'occupation réelle au scénario conventionnel.

Certaines installations présentent un niveau de bruit assez élevé. C'est pourquoi une attention particulière doit être consacrée à la conception et à la réalisation des installations, pour éviter ces problèmes d'acoustique (voir la suite : faibles vitesses, réseaux très étanches à l'air, bon réglage des ventilateurs...).

La qualité d'air est assurée à la fois par le débit permanent, et par la présence de filtres sur l'air soufflé, pouvant aller jusqu'à la filtration du pollen (filtres F7). L'inconvénient va de pair avec l'avantage : ces filtres doivent être remplacés régulièrement (3 à 4 fois par an).

Comme on le voit, la ventilation double flux n'est pas la panacée, et demande une grande rigueur dans sa conception et à la mise en œuvre. Malgré cela, elle reste le seul système qui assure à la fois la bonne qualité de l'air et une performance énergétique élevée.

❖ Bonnes pratiques

Choix des centrales de traitement d'air

✓ Efficacité de l'échangeur :

Tout l'intérêt de la ventilation double flux, réside dans la récupération de chaleur. Il est donc essentiel de sélectionner un échangeur à haute efficacité. On peut atteindre des efficacités d'échange de plus de 85% pour les échangeurs à roue, et plus encore pour les échangeurs à plaques.

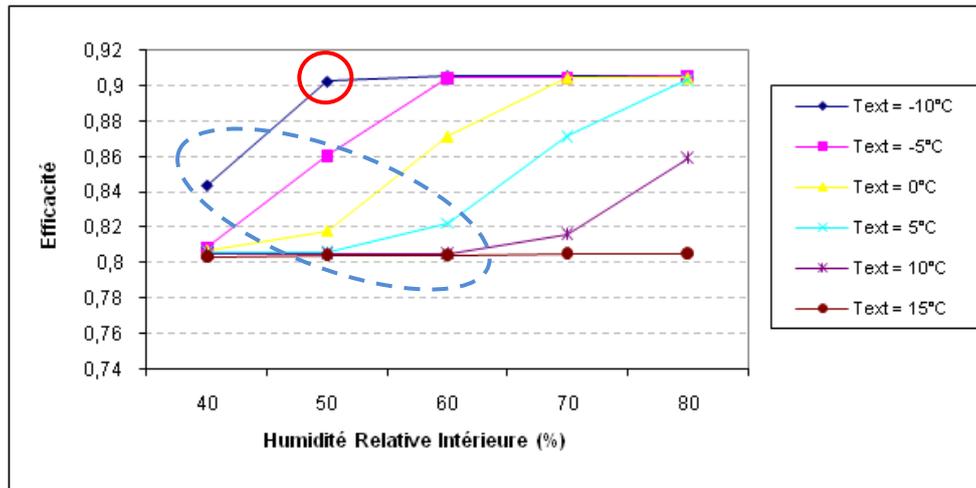
On souligne qu'**il existe différentes normes pour le calcul de l'efficacité** des échangeurs, selon qu'on l'exprime en enthalpie, en températures, et selon différentes hypothèses de température et d'hygrométrie. Pour comparer deux marques différentes, il convient donc de se baser sur des normes identiques (quand cela est possible...).

NB : en pratique il est recommandé de ne prendre en compte dans les calculs que 70% de récupération, pour tenir compte du dégivrage, des pertes thermiques des réseaux de ventilation extérieurs et de l'encrassement.

✓ Echangeur à roue ou échangeur à plaques ?

La réponse n'est pas évidente, et on doit prendre en compte plusieurs critères :

- L'efficacité : selon les données des fabricants, on peut penser que l'efficacité des échangeurs à plaque est meilleure que celle des échangeurs à roue. Cependant, cette efficacité est indiquée dans des conditions particulières de température et d'humidité, notamment d'humidité intérieure. Or les échangeurs à plaques sont très sensibles à ces paramètres, comme le montre le graphique suivant :



Variation de l'efficacité d'un échangeur à plaques en fonction de la température de l'air extérieur et de l'hygrométrie de l'air intérieur. Valeur nominale (environ 90%) entourée en rouge, valeurs courantes en fonctionnement réel entourées en bleu (humidité relative intérieure entre 20 et 60%, plutôt inférieure à 40% en hiver et jusqu'à 60% en mi-saison). L'efficacité « utile » est ainsi plutôt autour de 85%

Par ailleurs, la vitesse de rotation des échangeurs à roue peut (doit) être réglée de façon à maintenir une efficacité constante (voir partie Mise au point, § 3.4.4).

Ainsi en pratique, l'efficacité en conditions réelles des bons échangeurs à roue et à plaque est comparable (autour de 85%).

- Le dégivrage : il ne concerne que les échangeurs à plaque, et pas les échangeurs à roue. Voir le paragraphe suivant.
- Les pertes de charges internes à la CTA : elles sont plutôt plus élevées pour les échangeurs à roue.
- L'encombrement et les gammes de débit : les CTA à roue sont plus compactes que les CTA à plaques. C'est pourquoi pour les débits importants les CTA à roues sont souvent privilégiées.
- Les CTA à roue présentent un risque de recyclage d'air extrait vers l'air soufflé. On peut réduire fortement ce risque par une bonne conception : il suffit que la pression côté soufflage de l'échangeur soit supérieure à celle côté reprise pour éviter le problème. Un secteur de purge peut compléter cette disposition, afin de vider le volume d'air contenu dans les alvéoles de la roue.

✓ La question du dégivrage :

La problématique se présente pour les échangeurs à plaques, sur lesquels un air extérieur froid (inférieur à -2°C environ) aspiré va faire geler l'humidité contenue dans l'air extrait. Il se forme du givre, qui va colmater voire endommager l'échangeur. Pour éviter cela, les centrales incluent des dispositifs de dégivrage :

- Soit une batterie de préchauffage. Solution à éviter : les batteries, généralement électriques, sont généralement très mal réglées (régulation tout ou rien, consigne mal réglée) et ont au final une consommation d'électricité très importante ;
- Soit une régulation qui arrête le ventilateur de soufflage le temps que l'air extrait réchauffe l'échangeur. Pendant ce temps, l'air rentre dans le bâtiment... par les défauts d'étanchéité à l'air (il en reste toujours). C'est donc de l'air froid qui rentre dans le bâtiment ;
- La régulation peut aussi piloter un by-pass proportionnel de l'échangeur pour envoyer moins d'air froid sur celui-ci. Mais on fait alors rentrer de l'air plus froid dans les logements ;

- Dans les deux cas précédents, si on fait un bilan en besoin de chauffage, ceci revient à une dégradation de l'efficacité de l'échangeur à moins de 70% pour une température de base de -10°C. Certes, ceci ne concerne que quelques jours dans l'année, mais cela doit être pris en compte dans les calculs, notamment dans la puissance à installer pour le chauffage.

On voit que cette question n'a pas de bonne solution. **C'est un vrai défaut des échangeurs à plaques.**

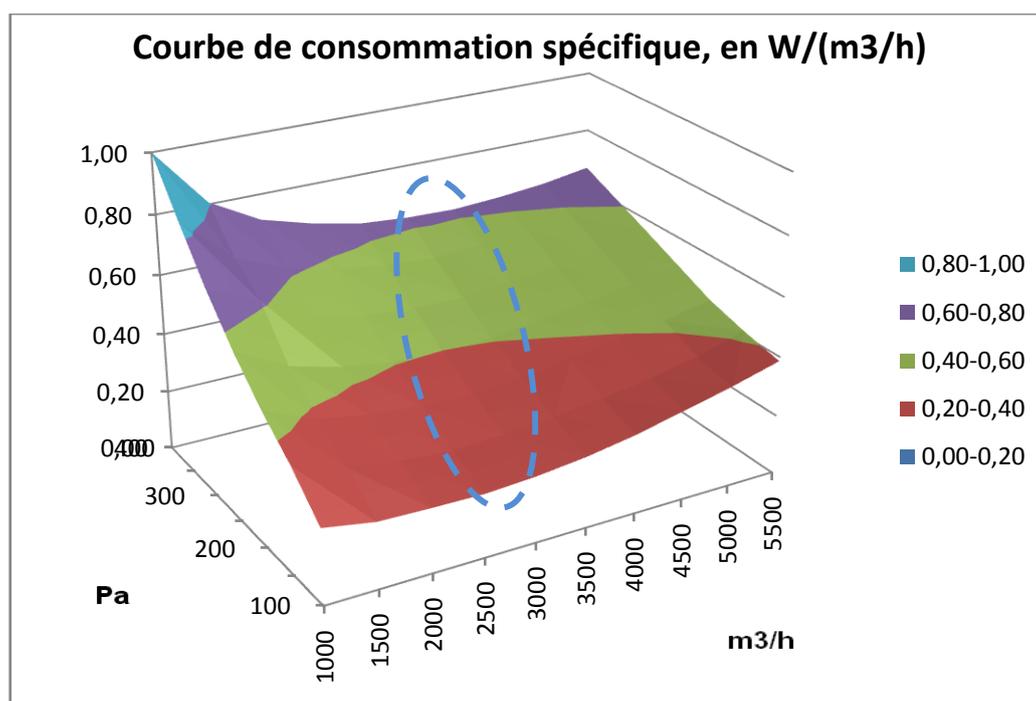
A noter que la présence d'un **puits canadien** permet d'éviter le problème en préchauffant l'air avant la centrale, ce qui supprime ce défaut des centrales à plaques. En maison individuelle notamment, la combinaison puits canadien et ventilation double flux à plaques s'avère ainsi une excellente solution.

✓ La consommation électrique des ventilateurs :

La puissance électrique consommée par un ventilateur dépend à la fois du débit, des pertes de charges, et de son rendement (rendement moteur, mécanique, et d'aubage).

Afin de réduire la consommation des ventilateurs, les constructeurs ont développé des **gammes à faible consommation**, que ce soit pour les extracteurs simple flux ou les centrales double flux. Ainsi les aubages (« pales » du ventilateur) sont optimisés (aubages à réaction pour les centrales double flux), la transmission est directe et non plus par courroie, la motorisation est à courant continu (moteurs ECM).

Par ailleurs, il faut savoir que pour un même ventilateur donné, la consommation spécifique peut varier énormément avec le débit, comme le montre le graphique ci-dessous :



Evolution de la consommation spécifique d'électricité en W/(m3.h) pour une CTA à roue équipée d'aubages à réaction en fonction du débit et de la perte de charges externe à la CTA. Les valeurs minimales sont atteintes dans la zone en pointillés bleus.

Le graphique ci-dessus permet de réaliser les enjeux d'une faible consommation électrique. On note en effet que :

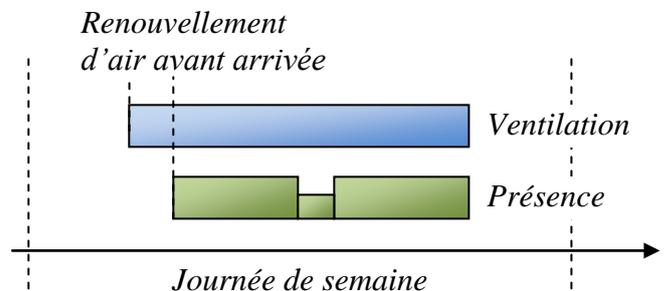
- La consommation électrique augmente de façon quasiment proportionnelle avec les pertes de charges du réseau. Une centrale qui consomme peu, c'est donc avant tout **un réseau à faibles pertes de charges** (voir la suite).

- A pertes de charges égales, on note que la consommation minimum est atteinte autour de la moitié du débit nominal de la centrale (ovale en pointillés bleu). La forme de la courbe est liée à l'évolution à la fois de la perte de charges interne de la CTA (qui augmente avec le débit) et à celle du rendement d'aubage (colline de rendement). On peut donc réduire la consommation en sur-dimensionnant la CTA (c'est surtout vrai sur les CTA à roue). Il est donc important en phase de conception de **comparer plusieurs modèles, et de retenir celui qui aura la consommation électrique la plus faible**, quitte à surdimensionner un peu les CTA.

✓ Asservissement et programmation :

Enfin, la consommation annuelle d'un ventilateur dépend évidemment du **nombre d'heures de fonctionnement**. En logement, le fonctionnement doit être permanent, mais on peut réduire la consommation en faisant varier le débit (gestion du grand débit en cuisine). On peut donc concevoir une régulation à pression constante. En ventilation double flux, l'idéal est de réguler à pression constant sur la reprise, et d'asservir le ventilateur de soufflage sur un débit identique. Cela dit, compte tenu de la faible utilisation du grand débit en cuisine¹⁷ et de sa faible efficacité pour évacuer les odeurs, on est en droit de se demander si une régulation à débit constant (au débit de base) ne serait pas une simplification salubre...

Dans le tertiaire, on peut arrêter complètement la ventilation hors occupation (la nuit, le week-end, pendant les vacances...). Afin d'assurer la qualité de l'air, il convient de **programmer le redémarrage de la ventilation suffisamment avant l'arrivée des utilisateurs** pour que tout l'air soit renouvelé (par exemple si le débit correspond à 1 vol/h, redémarrer la ventilation 1 h avant).



Dans certains cas il peut être pertinent de faire varier le débit, sur détection de présence ou sonde CO₂. Il convient cependant de s'assurer que la complexité que ceci génère n'est pas disproportionnée par rapport au gain énergétique. En effet, une telle régulation implique un asservissement à pression constante qui n'est pas évident à mettre en œuvre, et surtout une maintenance qui peut être coûteuse (réétalonnage des sondes CO₂...). Il faut souligner que dans la plupart des cas, l'essentiel de l'économie d'énergie est réalisé par l'arrêt de la ventilation hors occupation.

✓ Question de la ventilation des sanitaires des bâtiments tertiaires :

En conception classique, le réflexe est de prévoir un extracteur simple flux pour les sanitaires des bâtiments tertiaires, même si on est en ventilation double flux. Comment assurer alors l'arrivée d'air ? Par des entrées d'air de type simple flux ? Et pourquoi s'imposer cette complexité supplémentaire ?

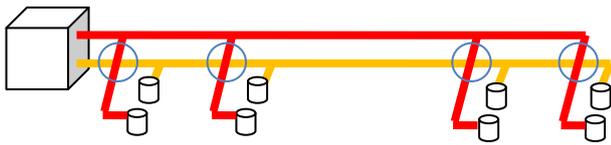
Il est tout à fait possible de raccorder l'extraction des sanitaires sur une ventilation double flux. C'est à la fois une simplification du système, une économie à la construction, et un gain énergétique.

Conception des Réseaux de ventilation

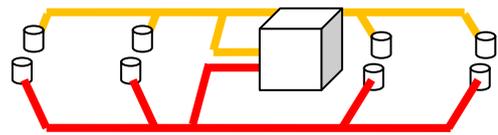
✓ L'optimisation du tracé des réseaux :

Comme évoqué au § 2.3.1, la simplicité et la performance des réseaux est le fruit d'un travail commun entre le BET fluides et l'architecte. La position centrale du local CTA permettra de créer des réseaux en étoile. Un travail sur les cheminements permettra de réduire le nombre de coudes, notamment en évitant les croisements, etc.

¹⁷ : voir campagnes de mesures d'Enertech, rapports sur www.enertech.fr



Réseau de soufflage et de reprise du même côté par rapport aux tés souches : croisement de réseau nécessaire à chaque piquage (cercle bleu).



Réseau en étoile, et collecteurs de part et d'autre des tés souche : aucun croisement de réseau. Il y a moins de coudes et on réduit les pertes de charges.

Afin de réduire les pertes de charges, **prévoir autant que possible des coudes et piquages à 45°**. Les piquages doivent être réalisés par des pièces d'usine **et non par découpe et pose de collerette**, car de telles coupes réduisent la section de passage et augmentent les pertes de charges :



Réseau avec coudes à 45°



Piquage avec té oblique à 45°



Culotte à faible pertes de charges

✓ Le dimensionnement des conduits :

L'enjeu du dimensionnement des réseaux de ventilation est double : le choix des diamètres doit permettre à la fois **d'éviter le bruit**, et de **limiter les pertes de charges**.

L'intérêt d'un réseau en étoile et à faibles pertes de charges est qu'il peut être auto-équilibré : de simples modules de régulations ou bouches auto-réglables peuvent suffire à équilibrer le réseau, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter des iris ou volets de réglage.

Pour cela, les valeurs recommandées sont : une vitesse de 3 m/s maximum pour les conduits terminaux, 4 m/s dans les circulations, 5 m/s dans les conduits collectifs verticaux et 6 m/s en toiture. Veiller de façon générale à ne pas dépasser une perte de charge linéaire de 0,07 mmCE/m (millimètre de colonne d'eau de perte de charge par mètre linéaire de réseau).

✓ L'étanchéité à l'air des réseaux :

C'est un sujet récent, mais pourtant un **enjeu essentiel à la fois pour la performance thermique et la consommation électrique des ventilateurs**, ou encore pour l'acoustique des réseaux.

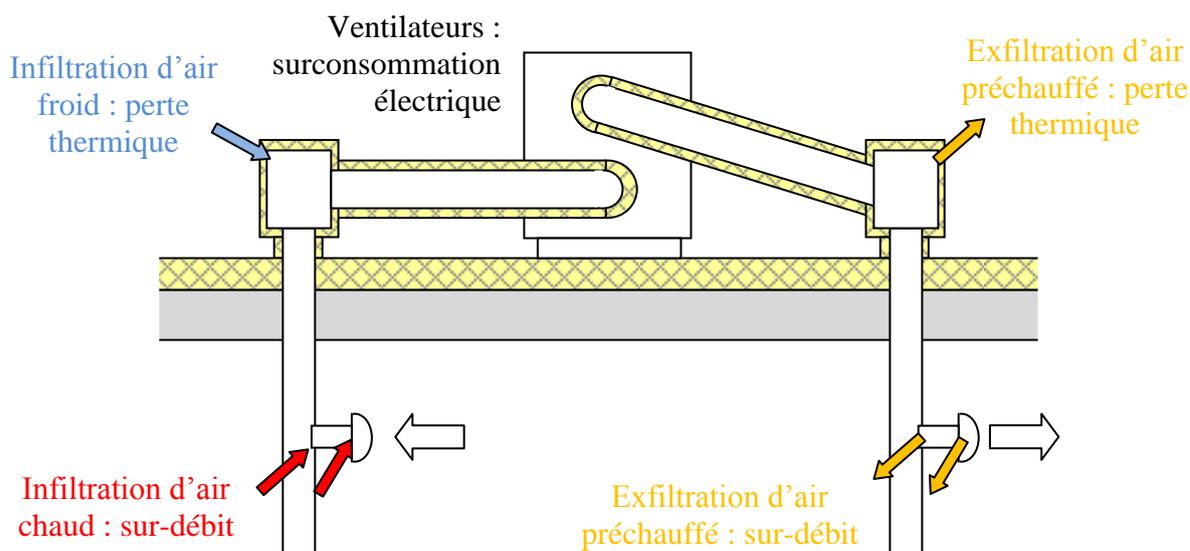


Illustration des enjeux de l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation

De façon évidente, les fuites génèrent un sur-débit par rapport au débit voulu. Ces fuites proviennent en grande partie de l'intérieur du bâtiment. Sur le réseau d'extraction simple flux ou double flux, c'est donc un supplément d'air chaud qui est extrait, donc une charge thermique supplémentaire pour le bâtiment.

A noter que dans le cas de la ventilation hygroréglable, les fuites peuvent être prépondérantes sur la variation de débit des bouches, ce qui explique qu'on mesure parfois un débit constant à l'extracteur¹⁸.

En double flux, les fuites sur le réseau à l'extérieur du bâtiment, donc en air froid, dégradent la récupération de chaleur, et augmentent le besoin de chauffage.

Dans tous les cas, les fuites augmentent le débit aux ventilateurs, donc leur consommation électrique.

Pour quantifier l'étanchéité à l'air des réseaux, il est fortement recommandé de réaliser des **tests d'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation** en cours de chantier. Ce type de test est d'ailleurs nécessaire en fin de chantier par exemple pour l'obtention du label Effinergie +. Des normes¹⁹ définissent les protocoles de mesures et des classes d'étanchéité à l'air des réseaux :

Classe	"3A"	A	B	C	D
Valeur K $m^3/s / m^2 \cdot Pa^{0.65}$	$0,081 \times 10^{-3}$	$0,027 \times 10^{-3}$	$0,009 \times 10^{-3}$	$0,003 \times 10^{-3}$	$0,001 \times 10^{-3}$

NB : dans cette classification, la classe A est la moins bonne et la classe D est la plus performante. La classe « 3A » correspond à 3 fois le débit de fuite de la classe A.

¹⁸ : Campagne de mesure sur la ZAC Confluence à Lyon, réalisée par Enertech.

¹⁹ : NF EN 12237, NF EN 1507, NF EN 13403, NF EN 12599 et Fascicule Documentaire FD E51-767

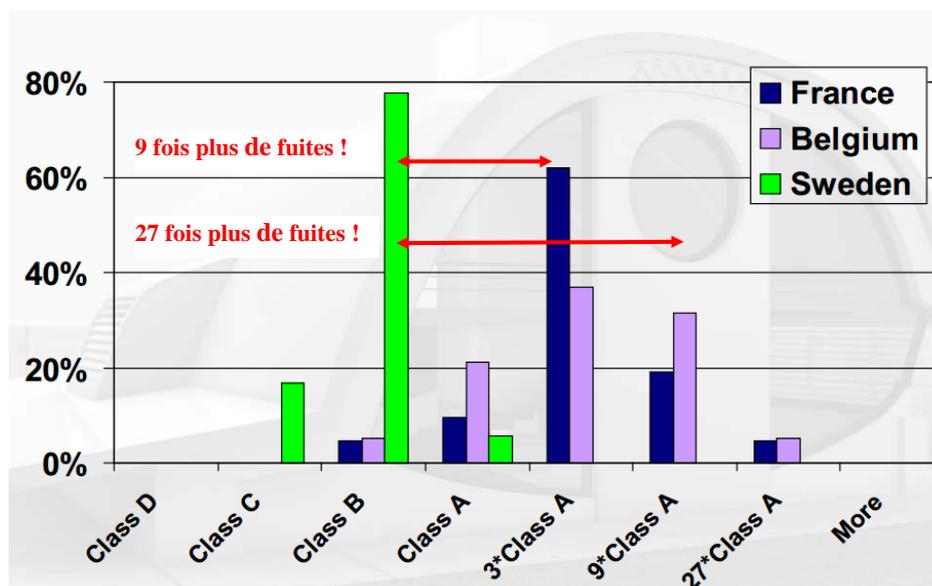
Le coefficient K exprime un débit de fuite (en m3/s) par m² de réseau (surface extérieure des conduits), pour une pression de 1 Pa. Pour fixer les idées, on peut calculer des ordres grandeur de taux de fuite par rapport au débit de ventilation voulu :

Hypothèses (exemple) :	Pression de service	Dont PdC fixe	Surface de réseau	Débit de base
Logement	120 Pa	70 Pa	29 m ²	4x105 m3/h
Enseignement	200 Pa	70 Pa	110,8 m ²	2000 m3/h

Classe		"3A"	A	B	C	D
Logement	Taux de fuite	45%	15%	5%	2%	1%
	Surconso ventilateur	+112%	+31%	+10%	+3%	+1%
Enseignement	Taux de fuite	65%	22%	7%	2%	1%
	Surconso ventilateur	175%	45%	14%	4%	1%

Il s'agit évidemment d'ordres de grandeur, qui dépendent à la fois de la compacité du réseau et de la pression de service, donc des pertes de charges du réseau. Plus le réseau sera compact et à faibles pertes de charges, plus le taux de fuite sera faible.

On note que la pratique actuelle sur les chantiers courants (hors hôpitaux, où les réseaux doivent être de classe C) aboutit à des **mesures majoritairement en classe 3A** (graphique ci-dessous). De façon cohérente, la valeur par défaut prise en compte dans la RT 2012 est 2,5 x la classe A²⁰. Les sur-débits et surconsommations électriques des ventilateurs sont donc actuellement très importants.



Comparaison des résultats de tests d'étanchéité des réseaux de ventilation en France, Belgique et Suède
Source : Save-Duct project1999

Le graphique ci-dessus permet de conserver notre optimisme : **l'inétanchéité des réseaux n'est pas une fatalité !** Les pays scandinaves ont sur le reste de l'Europe une longueur d'avance en la matière. Les Finlandais ont même dû ajouter une classe E !

Bonne pratiques au stade de la conception

- ✓ Préconiser des assemblages à **joint et bandes de recouvrement avec adhésif butyl** (car les vis autoforeuses créent des fuites qu'il faut traiter), ou bien assemblage par mastic **et** bandes de recouvrement à adhésif butyl,

²⁰ : règles Th-BCE 2012, chapitre 8.2.3.4.

- ✓ Les gammes de matériel disponible en France sont déjà en train d'évoluer : on trouve désormais chez certains fabricants des assemblages à double joint et clipsés, sans vis.



Assemblage à double joint, sans vis, d'un fabricant suédois

- ✓ **Eviter autant que possible les conduits rectangulaires**, qui sont très difficiles à rendre étanches, ainsi que les conduits oblongs, qui présentent des fuites intrinsèques (les conduits oblongs sont réalisés à partir de conduits ronds : l'opération d'aplatissage crée des fuites dans l'agrafage du conduit). Préférer autant que possible les conduits rigides ronds.
- ✓ **Proscrire les piquages par découpe et adjonction de collerette** : systématiser les pièces de piquage assemblées en usine.
- ✓ **Bannir les conduits souple aluminisés**, qui sont très fragiles et se déchirent très facilement sur chantier (sachant que c'est la peau extérieure qui est étanche, la peau intérieure est perforée pour améliorer l'acoustique). Limiter la longueur des conduits souples à 1 – 1,5m (suffisant pour le traitement acoustique terminal).
- ✓ Préférer un **réseau terminal semi rigide** (PEHD en logement, alu en tertiaire,...) ;
- ✓ Attention au choix des **caissons de répartition** (pour la ventilation double flux en logement) : beaucoup sont actuellement très fuyant... Choisir des équipement de classe C.
- ✓ De façon générale, attention à tous les organes particuliers : batteries, trappes de ramonages, tés souches, portes de CTA, manchettes. Préconiser des organes de classe C ou D,
- ✓ Préconiser un **système de raccordement à joint des bouches** de ventilation sur manchon adapté.

La diffusion d'air

La diffusion de l'air est un enjeu à la fois de **qualité d'air** et de **confort**. Une bonne diffusion permet de renouveler l'air efficacement et d'évacuer les polluants (mieux ventiler plutôt que ventiler plus). La maîtrise de la direction et de la vitesse de l'air à la diffusion est également un enjeu central du confort des utilisateurs.

- ✗ **Lien avec la question du préchauffage de l'air** : une réponse parfois apportée pour améliorer le confort des utilisateurs est l'ajout d'une batterie de préchauffage de l'air. Cette solution s'avère inadaptée, car la notion de confort est plus liée à la vitesse qu'à la température d'air. Même sur des opérations en chauffage par air chaud, des utilisateurs se sont plaint d'inconfort, du fait d'une vitesse d'air trop élevé.

De plus, le préchauffage de l'air à une température de consigne fixe ne permet pas de valoriser les apports internes : si le soleil chauffe le bâtiment et que la consigne est atteinte, la batterie continue à dépenser de l'énergie pour chauffer l'air... les surconsommations peuvent être catastrophiques.

C'est pourquoi la réponse de bon sens réside non dans le préchauffage, mais dans la bonne diffusion de l'air.

Bonnes pratiques :

- ✓ **Eviter l'effet « douche froide » des bouches orientées vers le bas.**



Ci-contre : illustration concrète de « douche froide » : les bouches mises en œuvre sont de simple grilles orientées vers le bas. Celle-ci est située juste au-dessus d'un poste de travail. L'utilisateur a « bricolé » un déflecteur pour dévier le flux d'air sur le côté, pour améliorer son confort...

Mieux vaut évidemment anticiper le problème dès la conception !

Ad minima prévoir un soufflage à l'horizontal, ce qui permet en théorie l'effet Coanda le long du plafond : l'air « colle » au plafond et traverse la pièce avant de redescendre.

- ✓ Privilégier les **bouches à longue portée**, qui permettent effectivement d'envoyer l'air sur une distance de 3m (voire plus, selon constructeurs).
- ✓ Si ce n'est pas possible, prévoir des diffuseurs plafonniers avec ailettes ramenant le flux à l'horizontale.

Ci-contre : bouche de diffusion à ailette horizontales (tertiaire)



- ✓ Une solution astucieuse et très performante est de souffler en plinthe. Ceci fonctionne particulièrement bien avec un réseau terminal encastré en dalle.
- ✓ L'idéal est la **diffusion d'air par déplacement** : la faible vitesse de l'air assure le confort. De plus, l'air soufflé issu de l'échangeur de la CTA est légèrement plus froid, donc plus lourd que l'air ambiant. Il va donc former une nappe au sol, qui va remonter en se réchauffant progressivement. Ceci crée un « effet piston » qui renouvelle l'air de façon très efficace.

NB : ce mode de diffusion est incompatible avec le chauffage par air chaud (pas d'effet piston).

Ci-contre : diffuseur d'air à déplacement



❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Ventilation			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Type de ventilation	Hygroréglable (qualité de l'air)	Autoréglable	Double flux
CTA	Transmission par poulie-courroie si possible (sauf C4)	Basse consommation Echangeur haute efficacité	CTA légèrement surdimensionnée pour réduire la conso. électrique.
Réseau	Réseaux sous-dimensionnés, bruyants... Piquages à la grignoteuse	Dimensionnement à faibles vitesses Pièces de transformations Mastic / joints + bandes de recouvrement butyl	Réseau en étoile Piquages et coudes 45°
Diffusion d'air	Mauvais balayage, effet « douche froide »	Diffusion d'air et balayage étudiés Soufflage à l'horizontale ou à défaut bouches à ailettes vers l'horizontale	Ventilation par déplacement Soufflage en plinthes

❖ *Pour aller plus loin*

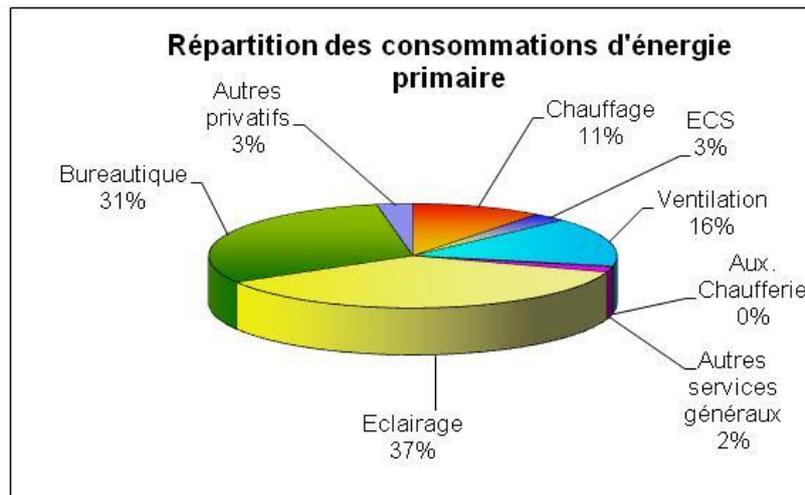
- *Rapports de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, sur www.oqai.fr*
- *Étanchéité des réseaux aérauliques, Guide pratique, réalisé par le CETIAT en 2012*
- *Enjeux : note « Formaldéhyde et renouvellement d'air » sur la qualité de l'air intérieur, disponible sur le site www.enertech.fr*
- *Fiche technique « La ventilation des bâtiments » réalisée par Enertech pour la MAF (Mutuelle des Architectes Français), disponible sur le site www.enertech.fr*

2.3.3 Chauffage

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Esq. à DCE	BET fluides	Régime de température d'émission adapté. Pas de surdimensionnement des générateurs

❖ Enjeux

Dans un bâtiment performant, bénéficiant d'une bonne enveloppe, d'une bonne étanchéité à l'air et d'une bonne ventilation, la part du chauffage est fortement réduite et peut devenir minoritaire par rapport aux autres usages.



Exemple de répartition des consommations pour un bâtiment de bureaux à énergie positive : le chauffage (au bois, pris en compte dans les Appels à Projets avec un coefficient d'énergie primaire de 0,2) ne pèse que 11% des consommations d'énergie primaire.

Pour autant on ne peut pas s'autoriser n'importe quoi. Il faut en effet raisonner en énergie primaire : **même pour un bâtiment Passif avec un besoin de 15 kW.h/m².an, le chauffage électrique n'est pas possible**, car il conduit à une consommation de 45 kW.h_{EP}/m².an, sur un objectif total de 120 kW.h_{EP}/m².an.

Mais on peut (et on doit) rechercher des simplifications (simple poêle bois en maison individuelle, mode d'émission de chaleur économique comme les radiateurs, voire les batteries) et de façon générale la réduction des puissances installées doit **générer une économie sur le coût de construction**.

Malheureusement on a pu constater certaines habitudes de conception qui conduisent à une trop grande complexité, moins de performance, et des coûts trop élevés. Il est nécessaire de se libérer de certains réflexes nés dans un contexte de moindre performance, et qui deviennent obsolètes voire nuisibles pour des bâtiments très performants.

Il est important de noter que suite à la réduction des besoins de chauffage, d'autres postes émergent au sein de la consommation de chauffage :

- les pertes de distribution hors volume chauffé, notamment les réseaux enterrés, ainsi que l'isolation de tous les organes en chaufferie,
- l'enjeu de la régulation terminale devient très important, car 1°C de dépassement de consigne ne pèse plus 8% comme avant, mais plutôt 15% à 18% pour un bâtiment BBC et plus de 20% pour un bâtiment passif.

❖ Bonnes pratiques

Génération de chauffage

Le premier choix est celui de l'énergie. Cette réflexion est à amorcer dès l'Esquisse car certains choix sont structurants, comme la construction d'un silo pour le bois, avec la prise en compte de son accès pour l'approvisionnement. Le choix est généralement rendu définitif à l'APD, après une étude technico-économique (à réaliser avec un ou plusieurs scénarii d'augmentation des prix de l'énergie). Sans entrer dans le détail, les principales énergies sont les suivantes :

- L'**électricité** : elle ne se résume pas à l'effet Joule, qui est catastrophique en énergie primaire (rendement proche de 100% sur énergie finale, mais pour 1 kW.h à la prise il faut plus de 3 kW.h d'énergie primaire à la centrale... donc un rendement sur énergie primaire de 30% environ). Au contraire, on peut exploiter au mieux la formidable énergie qu'est l'électricité avec des pompes à chaleur, pouvant générer plus de 5 kW.h de chaleur pour 1 kW.h d'électricité, soit une efficacité en énergie primaire de 150% !



- Le **gaz de ville**, est une énergie peu chère. On peut la valoriser au mieux avec une chaudière à condensation. C'est aujourd'hui une énergie fossile, mais on peut imaginer demain une part importante de gaz renouvelable dans le réseau (biogaz, méthanation sur électricité renouvelable...²¹). Dans les Appels à Projet, ce sont les kW.h PCS (pouvoir calorifique supérieur) qui sont pris en compte comme énergie primaire.

- Le **bois** est une énergie renouvelable, aujourd'hui peu chère au kW.h, et dont l'augmentation des prix sera très probablement inférieure à celle des énergies fossiles. La ressource est abondante en France (on exploite aujourd'hui les chutes du bois d'œuvre), mais pour autant la ressource n'est pas illimitée. C'est pourquoi dans l'Appel à Projets 2008, le bois a été pris en compte avec un coefficient d'énergie primaire de 0,2²², mais assorti d'un garde-fou en besoin de chauffage (voir § 1.2.1) pour éviter la dérive que serait un bâtiment mal isolé et chauffé au bois.



- Le **fioul** et le **propane** ne sont généralement envisagés qu'en l'absence du réseau de gaz. Il existe également des chaudières à condensation. Ces énergies fossiles sont chères, et leur prix va continuer à augmenter.

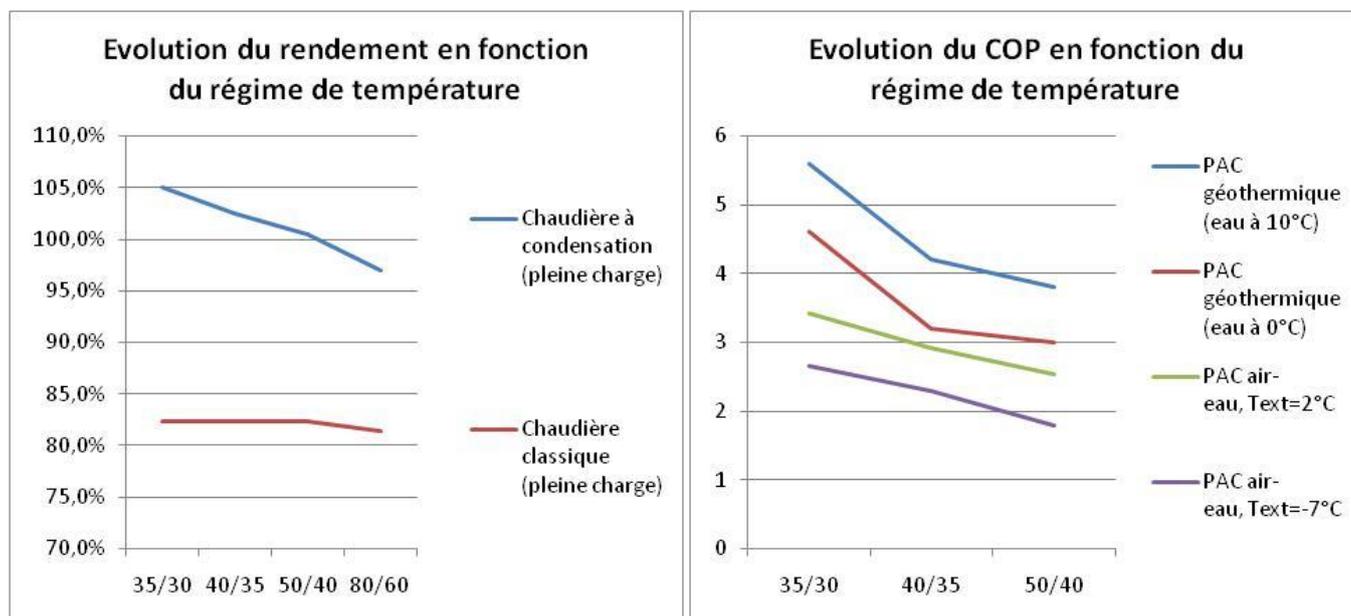
- Les **réseaux de chaleur** permettent de mutualiser une génération de chaleur à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. L'intérêt énergétique et économique d'un réseau de chaleur dépend beaucoup de la densité urbaine, car les pertes peuvent devenir très importantes par rapport aux consommations des bâtiments économes. D'un point de vue économique, la part de l'abonnement

²¹ Voir à ce sujet le scénario négaWatt – www.negawatt.org

²² Cette valeur, différente du coefficient 0,6 utilisé dans le cadre du label BBC, est issue d'études d'analyse du cycle de vie sur le bois énergie. Voir la note de base de page sur le sujet au § 2.3.8.

dans la facture énergétique peut être majoritaire pour les bâtiments à basse consommation, ce qui ne permet pas toujours de traduire la performance thermique en réduction de charges.

Il est important de garder à l'esprit que **la performance de la génération dépend fortement du régime de température**, comme l'illustrent les graphiques ci-dessous :



Exemple de courbe d'évolution du rendement de chaudières gaz (sur PCI) et du COP de pompes à chaleur en fonction du régime de température

Bonnes pratiques :

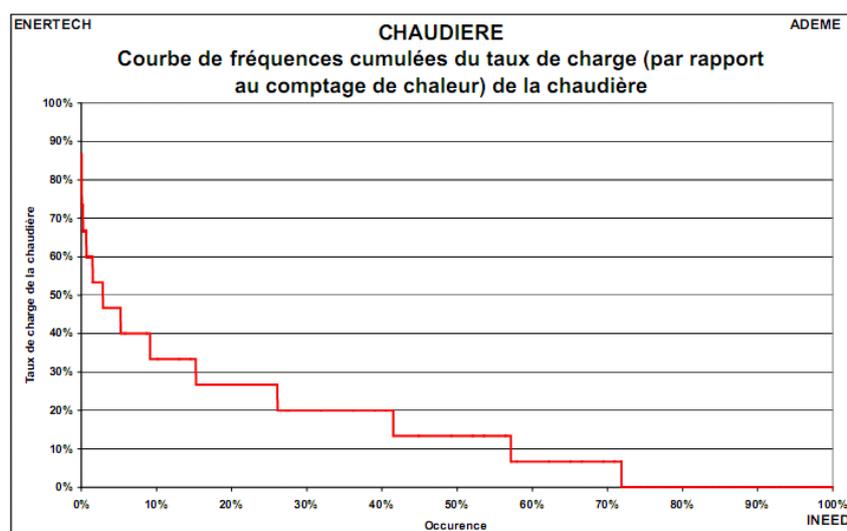
- ✓ Pour que les chaudières gaz à condensation condensent vraiment, la température de retour doit rester inférieure à 40°C (donc régime 60/40°C, ou de préférence 50/40°C en logement, compte tenu des problèmes d'équilibrage hydraulique avec de trop faibles débits)
- ✓ Le COP d'une pompe à chaleur (PAC) dépend de la différence de température entre la source et l'émetteur :
 - ainsi les meilleures performances sont obtenues avec les PAC géothermiques, car la température du sol reste quasi-constante autour de 10°C, tandis que les PAC sur air ont un COP dégradé en plein hiver (surtout sous 0°C, avec le dégivrage de l'évaporateur) ;
 - pour la même machine, le COP varie de façon importante avec le régime de température : il convient donc de privilégier l'émission par plancher chauffant (régime 35/30°C, voire inférieur), ou radiateur très basse température (régime inférieur à 50/40°C) ;
 - Avec une PAC géothermique et émission basse température on peut mesurer des COP réels de plus de 5 !
- ✓ Dans tous les cas prévoir une loi d'eau, qui permettra d'abaisser la température de départ pour le chauffage en fonction de la température extérieure. On réduit ainsi la puissance des émetteurs en fonction du besoin. A noter que les batteries chaudes également peuvent et doivent être régulées par une loi d'eau.

La question des surpuissances

Pour des questions évidentes de responsabilité, les bureaux d'étude ont toujours eu intérêt à surdimensionner les installations de chauffage. Comme cela, ils ne prennent pas de risque, et « qui peut le plus peut le moins ». Mais avec les bâtiments basse consommation, ce raisonnement ne marche plus :

- ✗ La plupart des chaudières modulantes ont un **rendement** à charge partiel moins bon que le rendement à pleine charge (c'est cependant de moins en moins vrai, avec l'arrivée de chaudières plus intelligentes, pouvant atteindre de meilleurs rendements à charge partielle) ;
- ✗ Un générateur surdimensionné va fonctionner en **courts cycles** : il va en permanence devoir s'allumer et s'arrêter, ce qui provoque de l'encrassement, et une durée de vie réduite,
- ✗ Dans tous les cas, le **surcoût** du générateur et des émetteurs surdimensionnés est à éviter, afin que l'investissement dans l'isolation et la ventilation performante soit compensé en partie par une économie sur le système de chauffage.
- ✗ Le cas des **chaudières individuelles** est le plus marquant : pour des logements ayant un besoin de 1 ou 2 kW, on installe souvent des chaudières de 24 kW, notamment à cause de référentiels comme Qualitel qui imposent un tel dimensionnement pour la génération d'eau chaude sanitaire. Elle va donc fonctionner très mal et risque d'avoir une durée de vie très courte. C'est pourquoi en logement collectif, la chaufferie collective s'impose comme une solution souvent moins chère dès la construction, et économe en énergie et en maintenance.

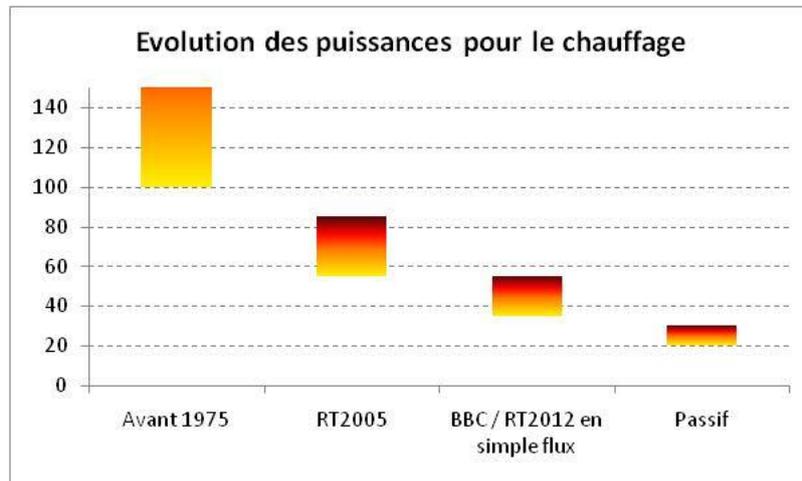
Il est important de rappeler que **la norme du calcul des déperditions²³ comporte déjà une marge intrinsèque** : aucun apport gratuit n'est pris en compte. Il est donc inutile d'ajouter une marge supplémentaire ! Ceci est confirmé par de nombreuses campagnes de mesures :



Exemple de courbe de fréquences cumulées de la puissance appelée, en % de la puissance installée (calculée au plus juste selon la norme). Le taux de charge de 50% n'a été dépassé que pendant 3% de la saison de chauffe. Une chaudière de puissance inférieure de 30% au calcul de déperditions aurait été suffisante. (Source : campagne de mesure d'Enertech, bâtiment INEED, hors AAP)

A titre d'ordres de grandeur, le graphique suivant illustre l'évolution des puissances à installer en W/m² pour des bâtiments de logement selon le niveau de performance :

²³ Norme EN 12 831.



Ordre de grandeur des puissances installées pour le chauffage, des bâtiments d'avant 75 au Passif

Bonnes pratiques :

- ✓ **Ne pas sur-dimensionner** les installations de chauffage,
- ✓ Prévoir des générateurs à **puissance variable** (chaudière modulantes, certaines PAC),

On note qu'il existe à présent des chaudières gaz individuelles de faible puissance et très fortement modulantes, qui offrent des solutions pour la maison individuelle.

- ✓ Prévoir un **ballon tampon** pour éviter les court-cycles avec les PAC fonctionnant en tout ou rien, voire également pour les chaudières bois (voir aussi § 2.3.6) qui ne sont pas toujours assez modulantes pour répondre aux courbes de charges très creuses (voir courbe de charge précédente) des bâtiments à basse consommation.

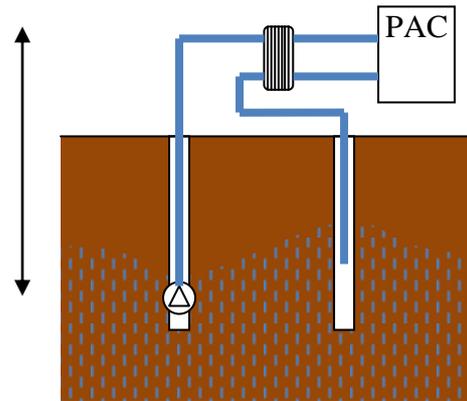
Auxiliaires de génération

La consommation électrique des auxiliaires de chauffage devient un enjeu non négligeable dans les bâtiments basse consommation.

- ✓ Les **pompes de classe A** permettent des économies d'électricité importantes qui justifient leur surcoût. Une directive Européenne (dite « EuP ») impose un Indice de Performance Énergétique (EEI) inférieur ou égal à 0,27 à partir de 2013, et inférieur ou égal à 0,23 à partir de 2015. En pratique il devient donc impossible d'installer des pompes qui ne soient pas de classe A.
- ✓ Afin d'éviter que les pompes fonctionnent alors que le chauffage n'est pas nécessaire, **les pompes doivent être asservies** au fonctionnement des générateurs, ou sur une température de non chauffe. Celle-ci peut être de 15°C sur 24h glissantes pour un bâtiment à basse consommation.
- ✓ Pour les circuits dont le débit peut être amené à varier (typiquement le circuit chauffage, sous l'action de la régulation terminale), ces pompes seront **régulées à vitesse variable**, ce qui permet de réduire encore la consommation électrique. Ce faisant, on abaisse également les températures de retour et on optimise le rendement des générateurs.
- ✓ Equiper les pompes ad minima de manomètres, voire de débitmètres à lecture directe (en l'absence de compteur de chaleur) pour la mise au point et la maintenance des installations.
- ✓ Attention à la consommation des **pompes du circuit capteurs des PAC géothermiques** :
 - Celle-ci peut être limitée et peu impacter le COP global dans le cas de circuit fermés (sondes « sèches » ou tube en U, et capteurs horizontaux) bien dimensionnés, et avec une pompe performante.

En revanche, une pompe sur nappe peut dégrader de plus d'un point le COP global, pour peu que la hauteur à remonter soit importante. Ainsi il est important de bien connaître la profondeur de la nappe (après rabattement) pour faire le choix entre forages sur nappe et forages secs, et privilégier ces derniers dès que la nappe est trop profonde.

*Hauteur manométrique pour la pompe :
hauteur de colonne d'eau à remonter
+ pertes de charge de l'échangeur
+ pertes de charge des conduits*



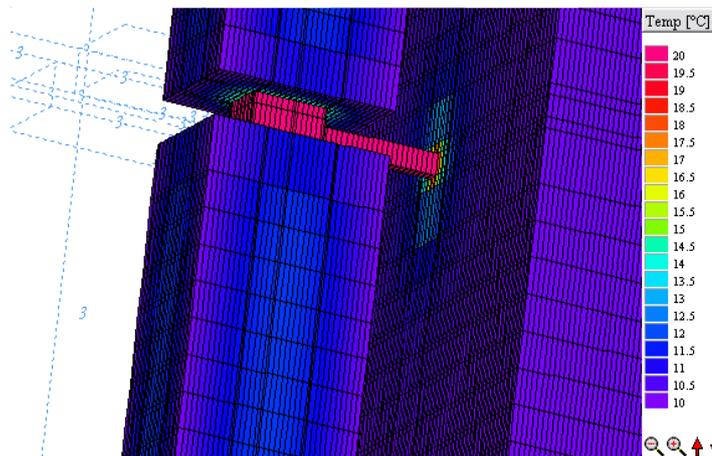
- Le dimensionnement de l'échangeur à plaques doit également être optimisé, à la fois pour sa perte de charge (on peut viser 1 mCE) et pour son pincement (toujours dans le but de réduire l'écart de température entre source chaude et source froide, et optimiser le COP).
- On peut réduire la consommation des pompes des circuits capteurs par la variation de vitesse, dans le cas de cascade de PAC ou de PAC modulante, par exemple sur une consigne de différence de température entre aller et retour aux forages.

Distribution

Les **pertes de distribution du réseau de chauffage** prennent une part relative plus importante dans les bâtiments à basse consommation, dont le besoin de chaleur diminue. Dans un souci de cohérence, il est important de s'assurer que les pertes de distribution soient maîtrisées. On distingue :

- Les réseaux en volume chauffé : les pertes sont récupérables, à condition qu'elles soient raisonnables, et que la régulation terminale soit performante (voir la suite). On recommande une isolation permettant de rester sous 10 W/m de pertes. Pour fixer les idées par rapport aux classes de calorifuges de la RT, on peut rester sur une classe 3 ;
- Les vraies pertes sont celles en **volume non chauffé**. Dans les sous-sols ou vide sanitaires, on visera une **déperdition inférieure à 7 W/m**.
- Les **réseaux enterrés**, contrairement à ce qu'on pense souvent, génèrent des pertes importantes. LA performance est en pratique limitée par les produits existants sur le marché, dont les performances ne sont pas toujours suffisantes. Il est donc capital de limiter ces longueurs et d'abaisser les régimes de température concernés.

Concrètement, les déperditions des réseaux hydrauliques se calculent à partir du régime de température, de la conductivité du calorifuge (qui varie en fonction de la température), et... des pertes générées par les **colliers de supportage**.



Calcul des déperditions d'un collier nu par éléments finis : l'augmentation des déperditions linéaires est de +15% en moyenne

Exemples de colliers pré-isolés

On peut mesurer l'impact de l'absence d'isolation des colliers par le calcul :

Type de collier			Collier non isolé				Collier pré-isolé			
Diamètre extérieur du tube			21 mm	34 mm	49 mm	70 mm	21 mm	34 mm	49 mm	70 mm
Régime	Calorifuge									
80/60°C	Mousse	Diamètre	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm
		Déperd.	12,2	15,8	19,9	25,1	10,8	14,0	17,6	22,2
	Laine	Diamètre	40 mm	100 mm	100 mm	100 mm	40 mm	100 mm	100 mm	100 mm
		Déperd.	9,7	8,0	9,2	11,2	8,6	7,1	8,2	9,9
	PIR	Diamètre	50 mm	60 mm	60 mm	60 mm	50 mm	60 mm	60 mm	60 mm
		Déperd.	6,7	8,4	10,3	12,7	6,4	7,5	9,1	11,3
50/40°C	Mousse	Diamètre	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm
		Déperd.	6,8	8,9	11,1	14,0	6,1	7,9	9,9	12,5
	Laine	Diamètre	30 mm	50 mm	60 mm	100 mm	25 mm	40 mm	50 mm	70 mm
		Déperd.	6,4	6,4	6,9	6,5	6,2	6,3	6,7	7,0
	PIR	Diamètre	25 mm	30 mm	50 mm	60 mm	25 mm	25 mm	40 mm	60 mm
		Déperd.	5,7	6,9	6,4	7,2	5,1	6,8	6,5	6,3
35/30°C	Mousse	Diamètre	13 mm	25 mm	32 mm	32 mm	13 mm	19 mm	32 mm	32 mm
		Déperd.	6,8	6,4	7,0	8,8	6,0	6,7	6,2	7,8
	Laine	Diamètre	20 mm	20 mm	30 mm	50 mm	20 mm	20 mm	25 mm	40 mm
		Déperd.	5,0	6,7	6,5	6,1	4,5	6,0	6,5	6,3
	PIR	Diamètre	25 mm	25 mm	25 mm	40 mm	25 mm	25 mm	25 mm	30 mm
		Déperd.	3,6	4,8	6,1	5,8	3,2	4,3	5,4	6,2

Tableau des déperditions en W/m de la distribution de chauffage, pour différents diamètres, différentes natures de calorifuges, avec collier non isolé ou avec collier pré-isolé. Epaisseur proposée pour atteindre 7 W/m² lorsque c'est possible dans la limite des épaisseurs disponibles (cases vertes).

Diamètre du tube		DN20	DN32	DN50	DN65
Régime					
80/60°C	Diamètre	35 mm	44 mm	41 mm	44 mm
	Déperd.	8,5	10,3	14,0	15,9
50/40°C	Diamètre	35 mm	44 mm	41 mm	44 mm
	Déperd.	4,9	6,0	8,2	9,3
35/30°C	Diamètre	35 mm	44 mm	41 mm	44 mm
	Déperd.	3,2	3,9	5,3	6,0

Même tableau pour conduit pré-isolé enterré (ligne simple, aller et retour dans la même tranchée).

Ces tableaux illustrent :

- La **difficulté voire l'impossibilité d'atteindre 7 W/m si le régime de température est trop élevé**. La réduction des régimes de températures (y compris la mise en place d'une loi d'eau) est donc un enjeu essentiel.
- L'impact important des colliers sur la déperdition moyenne (15% de déperditions en plus, contre 2% dans le cas des colliers pré-isolés) : **les colliers isolés sont donc à préconiser pour tout réseau extérieur au volume chauffé**.

Le pire des cas à éviter est celui d'un **circuit primaire distribué en enterré, devant assurer la production d'eau chaude sanitaire**, donc à un régime de température supérieur à 60°C toute l'année... Ce cas est à éviter à tout prix : préférer dans ce cas des productions ECS décentralisées par bâtiment, et ne limiter le réseau de chaleur qu'au chauffage, à un régime de température plus bas et avec une loi d'eau.

Bonnes pratiques pour la rédaction des CCTP :

- ✓ Préconiser des calorifuges performants : préciser la conductivité et l'épaisseur, ainsi que l'objectif de déperditions en W/m au régime de température prévu (critère de validation de variantes),
- ✓ Décrire des colliers pré-isolés pour les réseaux hors volume chauffé,
- ✓ Préciser que l'isolation sera maintenue à la **traversée des dalles et voiles béton**. Prévoir les réservations suffisantes, et un isolant coupe feu pour les forts diamètres. Voir aussi le détail page 67 pour assurer en même temps l'étanchéité à l'air.
- ✓ Décrire l'**isolation soignée de tous les points singuliers du réseau** (coquilles isolantes pour les vannes, coquilles pour les coudes, isolation des vannes de purge, etc), et en chaufferie (vannes, corps de pompe, échangeurs, compteurs de chaleur...). Prévoir des rehausses de levier pour la mise en œuvre de l'épaisseur d'isolant prévue sur les vannes.



Exemple de calorifuge complet d'une chaufferie



Isolation d'un échangeur.

Emission

Le choix et le dimensionnement des émetteurs a un impact direct sur la performance de la génération de chauffage, et sur les pertes de distribution : voir les paragraphes précédents.



Simple poêle à granulés pour le chauffage d'une maison rénovée



Batteries hydrauliques pour le chauffage d'un logement

L'enjeu du mode d'émission est également économique : le simplifier permet de valoriser la performance de l'enveloppe en **réduisant le prix de l'émission**. Notamment quand on dispose d'une ventilation double flux dans un bâtiment passif, il devient possible d'émettre la chaleur par un émetteur unique comme un poêle à bois, ou de simples batteries sur le chauffage. On réalise ainsi une moins-value par rapport à des radiateurs à eau par exemple. C'est la logique du PassivHaus allemand : investir dans l'enveloppe et la ventilation pour simplifier le chauffage.

Bonnes pratiques :

- ✓ Choisir et dimensionner des **émetteurs à basse température**, surtout quand la génération est assurée par une pompe à chaleur, ou une chaudière à condensation.
- ✓ Calculer les émetteurs au plus juste, **sans surpuissance**.
- ✓ **Il est tout à fait possible de prévoir une loi d'eau sur les batteries**. En effet le besoin de puissance varie avec la température extérieure comme pour les autres émetteurs, et la caractéristique d'émission des batteries est même plus linéaire que celle des radiateurs. Cette loi d'eau vient en complément de la régulation terminale par vanne trois voies à proximité de la batterie.
- ✓ Il n'est plus nécessaire de placer les radiateurs sous les fenêtres. En effet, les fenêtres performantes d'aujourd'hui ne constituent plus un point froid comme avant. Au contraire, on peut réduire le coût des réseaux terminaux en plaçant les radiateurs au plus près.

Régulation terminale

On rappelle que la température « légale » de chauffage des bâtiments, fixée par le code de la Construction, est de 19°C.

La régulation terminale a pour but d'assurer le respect de la température de consigne. On a vu (cf § 0) l'impact très important de la température sur le besoin de chauffage : **un degré de plus, c'est 15 à 25% de consommation de chauffage en plus !** La précision de la régulation devient donc un enjeu capital.

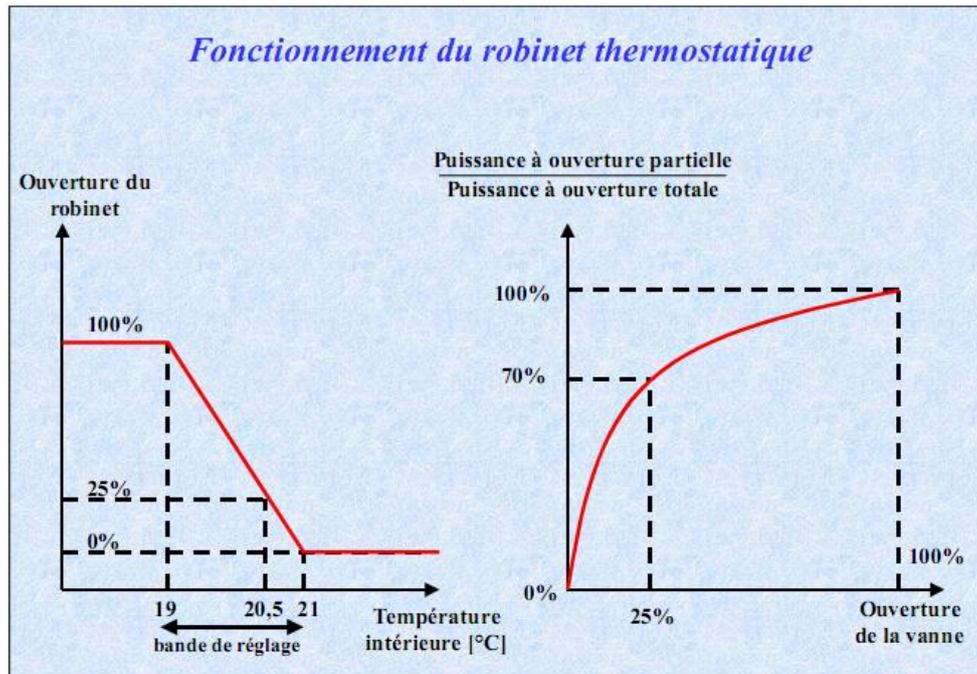


Illustration du fonctionnement d'un robinet thermostatique : dans l'exemple, à 20,5°C, la vanne est encore ouverte à 25%. Au régime de température considéré, la puissance de l'émetteur est alors de 70% de la puissance nominale : on a déjà dépassé la consigne, mais l'émetteur chauffe encore !

C'est pourquoi le **robinet thermostatique ne semble plus une réponse adaptée aux bâtiments très performants** : il réagit assez lentement, et sa précision reste faible malgré les progrès accomplis les dernières années. Il faut savoir que la régulation par robinet thermostatique n'est pas une régulation tout ou rien : sa fermeture est progressive, et l'effet de cette fermeture dépend de nombreux paramètres : bande proportionnelle du robinet, Kvs et autorité de la vanne thermostatique, équilibrage hydraulique du réseau, régime de température des émetteurs, etc. C'est en fait un phénomène assez complexe, comme l'illustre sommairement le schéma précédent.

C'est pourquoi la plupart des opérations des Appels à Projets ont mis en place des **régulations avec des thermostats et vannes tout ou rien**. Ceci permet une régulation beaucoup plus fine (jusqu'à une précision au dixième de degré), plus rapide, et donc une bien meilleure récupération des apports internes.



Thermostat électronique bridable (hors AAP)



Vannes électrothermiques pilotées par thermostat, sur nourrice de plancher chauffant



Vannes électrothermiques en faux plafond

Au début des Appels à Projets, il était demandé un thermostat par pièce, ce qui s'est avéré coûteux, complexe sur le chantier (il faut bien câbler le bon thermostat sur la bonne vanne...), pour un gain assez

relatif : en effet, sur les opérations en ventilation double flux, la température est très homogène sur toutes les pièces d'un logement. Il ne s'avère donc pas indispensable de régler précisément pièce par pièce.

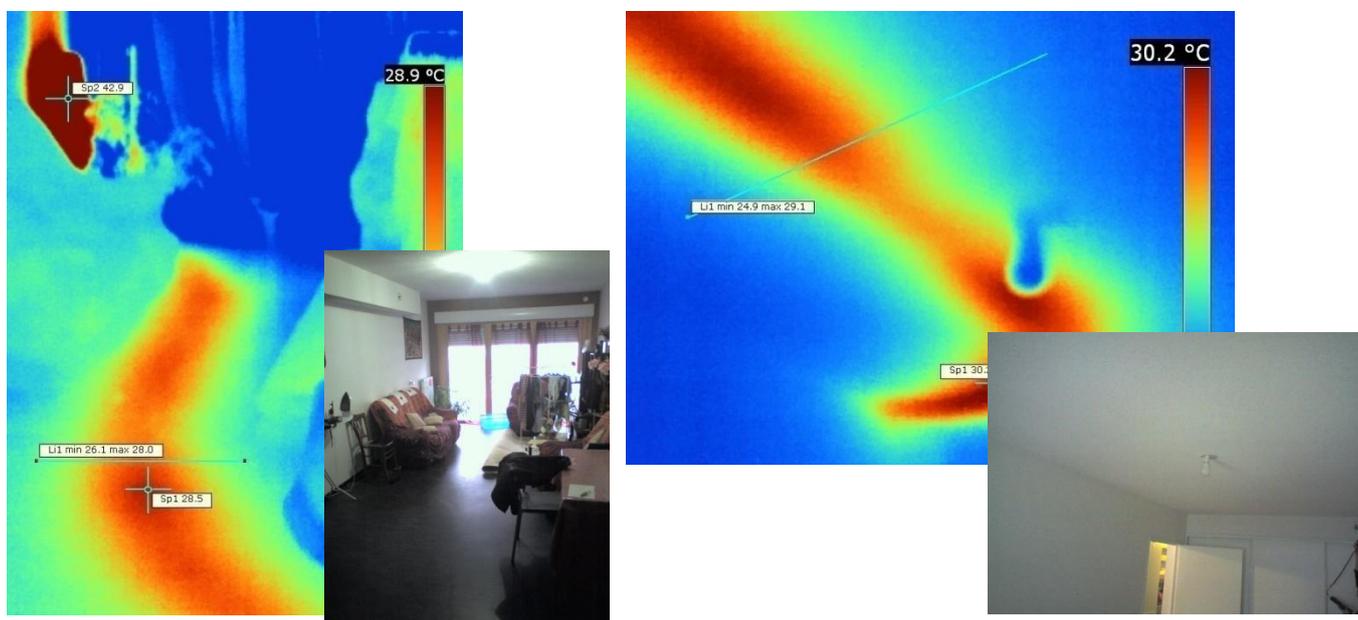
- ✓ C'est pourquoi par la suite, les projets se sont orientés vers une régulation avec **un thermostat par logement (ou par zone en tertiaire), avec en plus des robinets thermostatiques par pièce** (pour être conforme à la RT 2012 en logement).

Par contre, le vrai enjeu est la maîtrise de la consigne : ce n'est pas la peine de payer des thermostats précis au dixième de degré, s'ils finissent réglés sur 25°C... En accord avec le Maître d'ouvrage, les températures de consigne ont généralement été bridées entre 19 et 21°C. Cette température, convenue en amont avec le maître d'ouvrage, est à prendre en compte dans le calcul de la performance par la STD, cf § 0.

Bonnes pratiques :

- ✓ Prévoir des **thermostats bridables** par logement / par zone.
- ✓ Ils pilotent une vanne tout ou rien actionnée par un moteur électrothermique. Celui-ci sera à faible consommation et normalement fermé (NF), pour que sa consommation soit nulle hors période de chauffe.

Distribution en dalle Attention aux tubes PER (Polyéthylène Réticulé) en dalle : comme le montrent les thermogrammes ci-après, ces conduits chauffent la dalle et émettent beaucoup de chaleur, avec une forte inertie. **Il devient très difficile de réguler l'émission de chaleur, d'autant plus qu'elle se produit des deux côtés de la dalle.**



Emission de chaleur par les tubes PER en dalle, au niveau du plancher. (hors AAP)

Idem au niveau du plafond. (hors AAP)

- ✓ Solution : **préconiser des conduits pré-isolés.**

Ci-contre : PER pré-isolé en dalle, en attente pour un radiateur.



Les séquences de régulation

Le concepteur d'une installation technique a généralement une idée assez précise de comment celle-ci doit fonctionner. Mais il est malheureusement rare que ceci soit bien décrit dans les CCTP. Aussi, l'entreprise est livrée à elle-même pour établir l'analyse fonctionnelle, et prévoir les régulateurs ou automates adaptés.

- ✓ C'est pourquoi il semble essentiel que les **séquences de régulation attendues soient explicites dans les CCTP** :
 - En mode hiver quelle sonde de température déclenche l'allumage du générateur ? Comment est pilotée la modulation de puissance ? Y a-t-il une priorité ECS, totale ou relative ?
 - Quelles pompes fonctionnent à quel moment ? A débit fixe, à pression constante ?
 - Que se passe-t-il en ralenti, à la relance ?
 - Que doit-on arrêter hors saison de chauffe ?
 - Etc.
- ✓ Le schéma de principe doit permettre de compléter cette description, en précisant la position des sondes raccordées à tel ou tel régulateur.

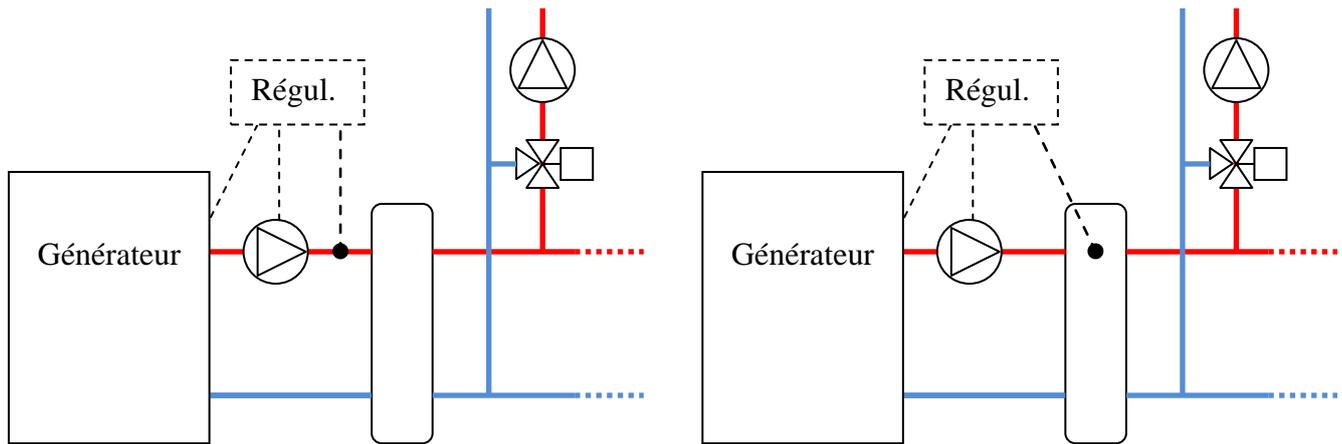
Bonne pratiques :

- ✓ Sur les bâtiments de logement à basse consommation et à forte inertie, la chute de température pendant la nuit est très faible. **On ne gagne donc rien à prévoir un ralenti de nuit pour les logements.** A contrario, on s'impose une puissance importante à la relance. Il devient donc préférable de ne pas effectuer de ralenti de nuit, et de ne pas prévoir de surpuissance à la relance.
- ✓ Ceci n'est pas valable pour les bâtiments tertiaires, pour lesquels le ralenti reste pertinent, notamment pour le week-end, les vacances, etc. Prévoir le temps suffisant pour une relance en douceur avant l'arrivée des occupants.
- ✓ Prévoir des thermomètres en nombre suffisant dans la chaufferie, pour faciliter la mise au point et la maintenance.

Points de vigilance :

- ✗ En présence d'une bouteille de découplage, attention à la **position de la sonde de température pilotant le générateur** et la pompe primaire : si elle est sur une canalisation, la pompe primaire

devra tourner en permanence pour irriguer la sonde. La placer plutôt en haut de la bouteille de découplage. Ainsi la pompe primaire pourra être arrêtée avec le générateur.



Légende :



Pompe



Vanne trois voies



Bouteille de découplage

Mauvaise position : la pompe primaire doit tourner en permanence

Bonne position : la pompe primaire peut être asservie sur le fonctionnement du générateur

- * En présence d'un ballon tampon ou d'une bouteille de découplage, bien prévoir une loi d'eau sur le circuit primaire, afin d'optimiser les rendements ou COP des générateurs. Les régulations actuelles permettent généralement de gérer le respect d'une loi d'eau en mode chauffage et le retour à une température fixe en mode production ECS.

Faut-il généraliser les GTC ? (Gestion Technique Centralisée)

Afin d'optimiser la régulation de l'ensemble des systèmes techniques, la solution des GTB, ou GTC, est très séduisante. Cependant, la mise au point de ces systèmes est complexe (phase de déverminage : il est indispensable de contrôler que chaque point de mesure a été câblé correctement, qu'il n'y a pas d'inversion entre deux capteurs, etc). Et si l'on obtient les réglages souhaités à la réception, qu'en sera-t-il 10 ans plus tard ? Les utilisateurs auront-ils la connaissance suffisante des logiciels (le plus souvent propre au fabricant de la GTC) ? En pratique ils risquent fort de se retrouver démunis pour piloter l'installation.

Le choix d'opter ou non pour une GTC doit donc être fait en cohérence avec les moyens techniques à disposition pour piloter le bâtiment pendant toute sa durée de vie.

Sauf pour des bâtiments tertiaires importants, pouvant disposer d'une personne hautement qualifiée, il est plutôt recommandé de limiter ce type d'équipement à du report d'information et de comptage (supervision), éventuellement du pilotage de consigne, mais de conserver des régulations locales (sondes de température, détecteurs de présence, etc) qui seront plus faciles à contrôler et mettre au point à la réception.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Chauffage			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Energie	Chauffage par effet Joule. Surdimensionnement	Chaudière gaz à condensation PAC air-eau	Bois PAC géothermique
Auxiliaires		Pompes de classe A, asservissement, T° de non chauffe	Régulation à débit variable si pertinent
Distribution	Proscrire les primaires enterrés devant assurer la production ECS	Travailler sur des bas régimes de température, prévoir une loi d'eau (même pour les batteries) Déperdition 10 W/m	Déperdition 7 W/m Colliers pré-isolés.
Emission		Emission basse température Coût faible par la simplicité et les faibles puissances	Liaisons terminales en dalle pré-isolées
Régulation terminale	Simple robinet thermostatique.	Un thermostat par logement ou zone, avec vanne tout ou rien	Thermostat électronique bridé.
Régulation		Décrire les séquences de régulation au CCTP	Mission de Mise Au Point confiée au BE.

2.3.4 Plomberie et ECS

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Esq. à DCE	BET fluides	Matériel hydro-économe, rendement du bouclage, rendement de génération (notamment en été)

❖ Enjeux

Le présent chapitre sera essentiellement centré sur le logement.

En effet, pour la plupart des **bâtiments tertiaires**, les consommations d'ECS sont marginales, et le plus souvent la solution réside simplement dans une certaine sobriété dans le choix des points de puisages alimentés en eau chaude (dans les Appels à Projets, de nombreuses écoles et de nombreux bureaux ont été réalisés avec une simple alimentation en eau froide pour les lave-main), et proscrire le bouclage au profit de petits ballons électriques décentralisés et surisolés (ajout d'isolant autour du ballon, photo ci-contre).

Les principes exposés ci-après restent intéressant en tertiaire, notamment tout ce qui concerne les équipements hydroéconomiques.

Ci-contre : ballon électrique surisolé dans un bâtiment tertiaire



Pour les **bâtiments de logements**, l'eau chaude sanitaire est un des principaux postes émergeant une fois qu'on a réduit le chauffage. Si rien de spécial n'est fait, la consommation pour l'ECS peut facilement dépasser 40 voire 50 kW.h/m², même en construction neuve²⁴.

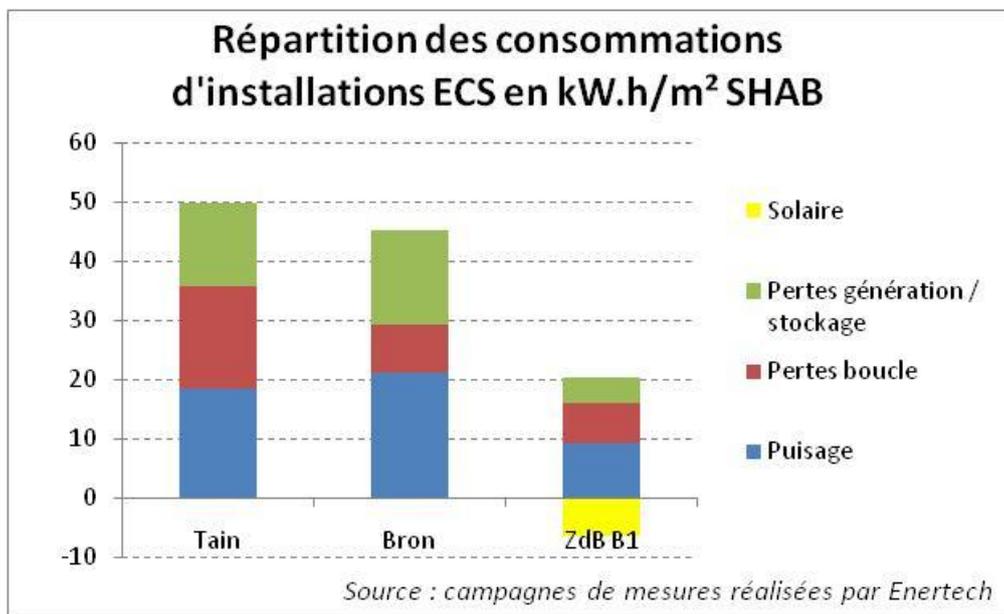


Illustration de la répartition des consommations de différentes installations ECS en logement collectif (hors AAP). On voit que la consommation d'énergie finale au compteur peut varier de 14 (ZdB B1, solaire déduit) à près de 50 kW.h/m²SHAB (Tain). Le rendement du bouclage varie ici de 50% (Tain) à 70% (Bron) environ. Le rendement de génération, enfin, varie de 65% (Bron) à 78% (Tain), ZdB B1 étant non concerné (échangeur de réseau de chaleur urbain).

²⁴ Campagnes de mesures d'Enertech, voir sur www.enertech.fr.

Il ressort de ces campagnes de mesures deux points marquants :

- ✗ Les pertes de la distribution (bouclage) peuvent conduire à un rendement de distribution proche de 60% en neuf avec un réseau calorifugé, voire 50% (soit autant de pertes que de puisages !) en rénovation avec des calorifuges peu performants (mousse expansée). **Il est donc essentiel de travailler à la fois sur les longueurs de réseau et sur les meilleurs calorifuges disponibles ;**
- ✗ Le rendement de génération peut s'avérer catastrophique, notamment en été où il peut descendre à 40%²⁵, compte tenu des cycles d'arrêt / redémarrage, et des pertes en chaufferie (circuit primaire, stockage).

❖ Bonnes pratiques

Maîtrise des puisages

Une démarche de bon sens sur l'ECS commence par un travail sur les puisages. Il existe actuellement toute une gamme de **matériel hydro-économe**, permettant de réduire significativement les puisages à confort égal.

Bonnes pratiques :

- ✓ Prévoir des douchettes hydroéconomiques, autolimitées à 6 l/min, voire moins ;
- ✓ Prévoir en cuisine des limiteurs de débit autorégulés (pas des simples mousseurs) à 6 l/min ;
- ✓ Prévoir pour les lavabos des limiteurs de débit autorégulés à 4,5 l/min ;
- ✓ Pour les lave-mains, des limiteurs autorégulés à 2,5 l/min ont été mis en place avec succès sur plusieurs opérations. Un Maître d'ouvrage nous a même fait ce retour très positif : « on a l'impression de se laver les mains à l'eau sèche » !
- ✓ Il existe également des robinetteries mitigeuses classées C3 : ces robinets sont en position eau froide lorsque le mitigeur est droit : ceci incite à utiliser de l'eau froide par défaut, au lieu de l'eau tiède qu'on ne désire par forcément.



Douchette hydroéconome (hors AAP)



Mitigeur classé C3, en position eau froide (hors AAP)

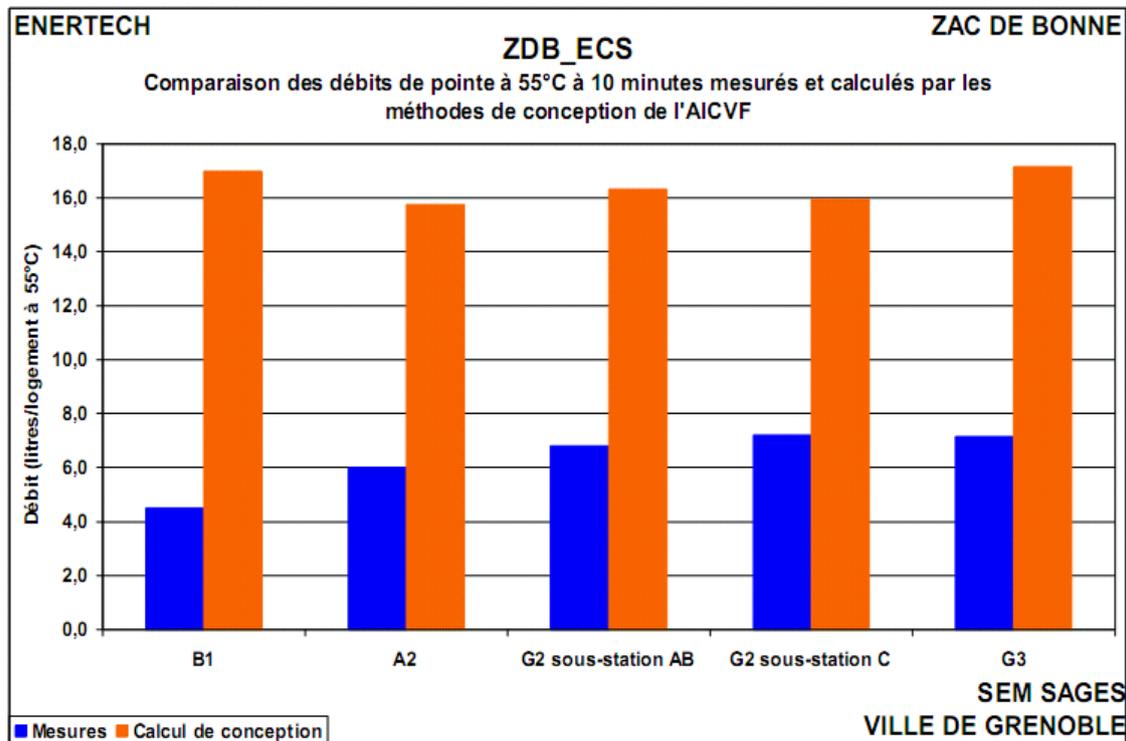
Génération d'ECS

- ✗ Les très mauvais rendements mesurés sont principalement liés à la présence d'un **circuit primaire**, qui présente des pertes thermiques. Celles-ci sont mutualisées avec le chauffage en hiver, avec un maintien en température sur toute la saison de chauffe. En revanche, en été, le circuit primaire est

²⁵ Campagne de mesure Restart, réalisée par Enertech

remis en température de façon intermittente, et pour le seul usage de l'ECS. Le rendement global de la chaudière au ballon est donc particulièrement dégradé en été.

- ✗ **Le surdimensionnement des débits de pointes théoriques** : des campagnes de mesures montrent depuis plus de 10 ans de manière récurrente que les débits de pointe à 10 minutes (et dans une moindre mesure les débits de pointe sur 1 heure) sont très inférieurs aux valeurs théoriques obtenues par les méthodes de dimensionnement classiques. Les valeurs observées sont inférieures d'un facteur variant entre 2,2 et 3,8. Le graphique ci-dessous illustre ce constat :

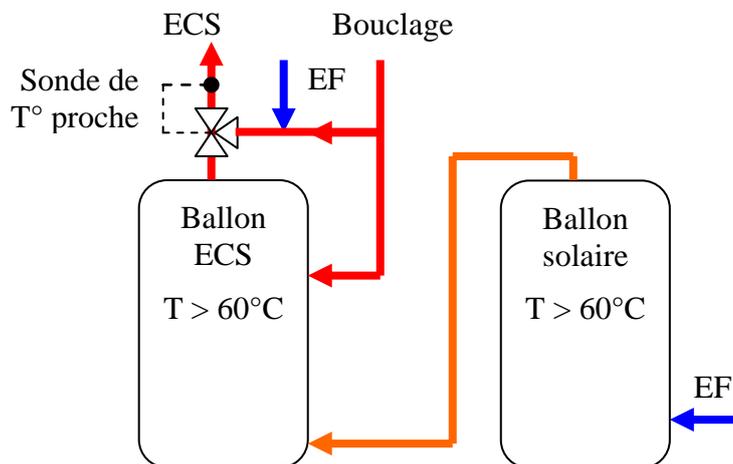


Comparaison des débits de pointes à 10 minutes mesurés et calculés (hors AAP).

L'écart entre mesure et calcul est encore plus grand pour les dimensionnements réalisés dans le cadre de certifications comme Qualitel (qui exigent des puissances encore plus élevées que le dimensionnement classique). Ces méthodes conduisent à des surpuissances importantes au dimensionnement des générateurs d'ECS. **Ce surdimensionnement n'est pas souhaitable, car il renchérit les installations, et dégrade leur rendement.**

Bonnes pratiques :

- ✓ Supprimer le primaire : préconiser des **préparateurs ECS indépendants**, avec brûleur inversé inclus au milieu du ballon. Il existe de tels préparateurs à condensation.
- ✓ Si cela n'est pas possible, réduire au maximum la distance entre générateur et ballon, et apporter le plus grand soin aux calorifuges de la chaufferie. En pratique, exiger l'isolation complète de tous les organes, telle qu'on la pratique sur les installations de froid pour éviter la condensation.
- ✓ Prévoir une **installation solaire** : celle-ci va avoir un taux de couverture maximal en été, et éviter le rendement très dégradé qu'a la génération d'appoint à cette période. Avec un rendement de 40% en été, chaque kW.h produit par le solaire évite la consommation de 2,5 kW.h d'énergie ! Voir § 2.3.6.
- ✓ Afin de réduire les pertes de stockage, prévoir **minimum 10cm d'isolant sur tous les ballons**.



Exemple de préparateur ECS indépendant à condensation (capot ouvert)

Schéma de principe avec raccordement du bouclage sur le mitigeur

- ✓ Mitigeur ECS : **raccorder le mitigeur sur eau froide et également au retour de bouclage** chaque fois que le ballon peut dépasser les 55°C (c'est à dire dès qu'il y a une production solaire, mais aussi dès qu'il y a une forte hystérésis sur la régulation du préparateur) voulus au départ de la distribution ECS. En effet, dans le cas contraire, le mitigeur ne peut abaisser la température du départ en l'absence de puisage.
- ✓ Préférer un mitigeur motorisé plutôt qu'un mitigeur thermostatique car ces derniers peuvent avoir une forte perte de charge que ne pourrait vaincre la pompe de bouclage.
- ✓ Prévoir des **compteurs de chaleur** pour le suivi des installations. Pour le solaire, préférer un compteur aux bornes du ballon solaire (pour déduire les pertes de ce dernier).

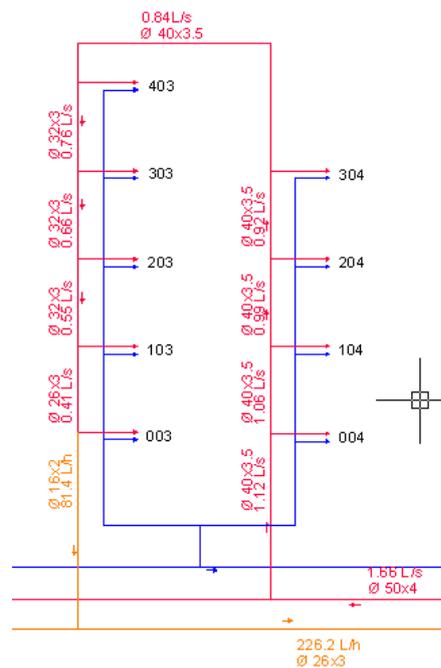
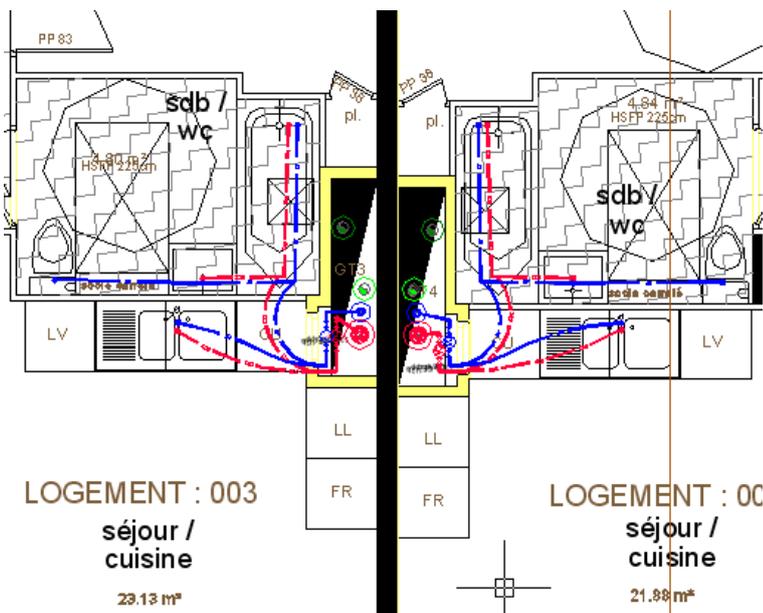
Distribution, bouclage

Les rendements de distribution ECS inférieurs à 60% sont malheureusement le cas général en distribution classique (bouclage).

Bonnes pratiques :

- ✓ **Eviter chaque fois que cela est possible la distribution bouclée :**
 - En maison individuelle le bouclage est à proscrire. Pour ce faire, un travail avec l'architecte est indispensable, afin de regrouper les points de puisages (rapprocher à moins de 8m cuisine et salle de bain), et ce dès l'Esquisse ou l'APS.
 - En tertiaire, en dehors des usages importants de l'ECS comme les cuisines, le plus efficace est en général de limiter l'ECS aux points de puisages indispensables, et de les équiper de **petits ballons électriques surisolés**. Afin de limiter les pertes de stockage, ces ballons pourront être mutualisés pour plusieurs puisages regroupés (y compris à des étages différents).
- ✓ **Proscrire le bouclage en dalle** : le niveau d'isolation ne sera jamais suffisant. Une telle conception génère un risque majeur de surchauffe des locaux traversés.
- ✓ En logement collectif, **éviter la distribution en gaine palière** car elle oblige à des distributions en dalle, forcément pas ou peu isolées, et qui conduisent à des surchauffes en été (la dalle joue le rôle de plancher chauffant : non seulement les utilisateurs attendent plus longtemps leur eau chaude, mais en plus les communs surchauffent de façon dramatique). Si une distribution en gaine palière est tout de même réalisée, raccorder les logements non pas en dalle, mais en distribution en faux plafond et isolée.
- ✓ Limiter les longueurs de bouclage : prévoir une gaine technique unique (voir § 2.3.1).

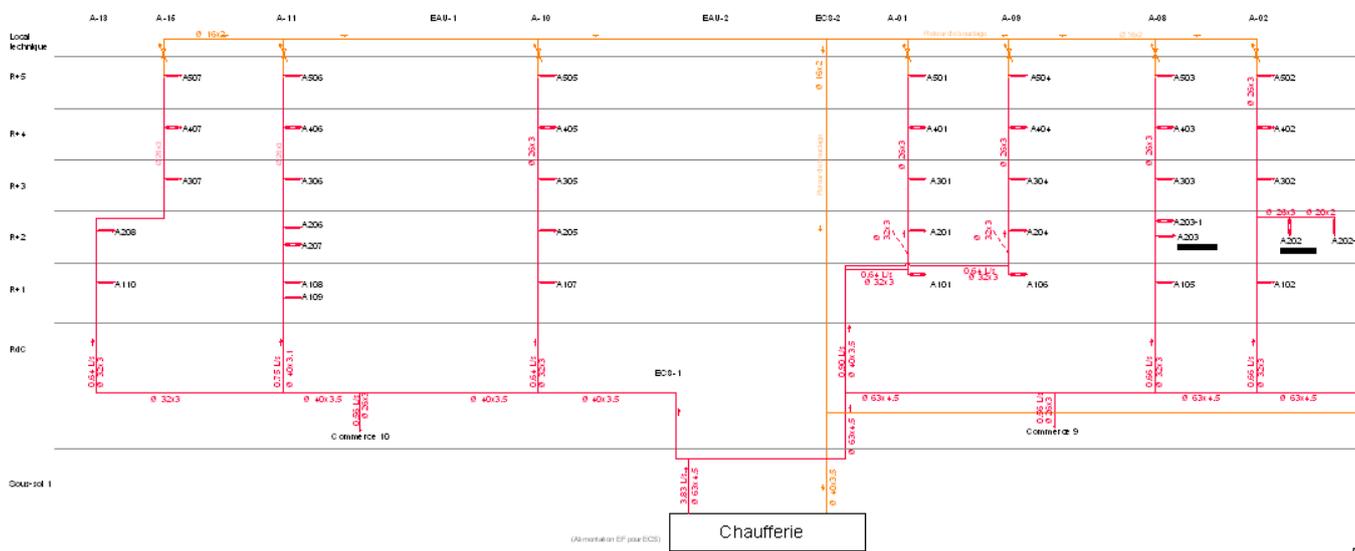
- ✓ Afin d'optimiser les longueurs de réseaux, il est possible de mutualiser la distribution entre deux gaines techniques accolées.



Exemple de gaines techniques accolées : mutualisation du bouclage (hors AAP)

Extrait de synoptique du réseau correspondant (hors AAP)

- ✓ On peut également concevoir un bouclage en parapluie :



Synoptique de distribution ECS en parapluie : les retours de bouclage sont regroupés sur une seule colonne. (hors AAP)

- ✓ Les réseaux ainsi optimisés seront **fortement calorifugés** (viser 7 W/m de déperditions), avec des **colliers pré-isolés** (voir § 2.3.3). Ces colliers pré-isolés sont déjà importants pour le chauffage hors volume chauffé, et ils ont un intérêt capital pour la distribution ECS en volume chauffé et non chauffé, car elle fonctionne toute l'année à 55°C !

- ✓ Les calorifuges seront maintenus à la traversée des voiles et dalles béton. Prévoir les réservations nécessaires. Voir également le détail page 67 pour traiter en même temps l'étanchéité à l'air.

Distribution terminale

- ✓ **Limiter les longueurs entre la colonne bouclée et les points de puisages.** Pour mémoire, le nouveau DTU 60-11 P1-2 (mis à jour en août 2013) limite à 8m cette distance. On a tout intérêt à réduire cette distance en-deçà de cette valeur pour améliorer le confort des utilisateurs (éviter de tirer des litres d'eau froide avant d'avoir de l'eau chaude...), la consommation d'eau potable, et les pertes énergétiques.
- ✓ Isoler les distributions terminales d'eau chaude en dalle (tubes pré-isolés prêts à être incorporés) afin de réduire le temps d'attente au puisage, et améliorer le confort d'été.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – ECS			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Tous	Proscrire le traçage (cordon chauffant électrique)	Matériel hydroéconome	
Tertiaire	Pas de bouclage (sauf usage ECS important en tertiaire)	Ballons électriques décentralisés et surisolés	
Maison individuelle	Pas de bouclage		Energies renouvelables : solaire, pompe à chaleur, poêle bouilleur...
Génération	Pas de circuit primaire long et mal isolé	Primaire très court et fortement isolé (comme un réseau d'eau glacée)	Préparateur indépendant à condensation ECS solaire
Distribution (logement collectif)	Pas de bouclage en dalle, éviter la distribution en gaine palière puis en dalle	Gaine technique unique, bouclage surisolé avec collier pré-isolés	Mutualisation de réseaux (gaine techniques accolées), bouclage en parapluie

❖ Pour aller plus loin

- Guide du CREAQ sur les matériaux hydro-économiques <http://www.creaq.org/wp-content/uploads/2010/09/guide-des-mat%C3%A9riels-hydro%C3%A9conomes-2010.pdf>
- Fiche technique « Eau chaude sanitaire » réalisée par Enertech pour la MAF (Mutuelle des Architectes Français) disponible sur le site www.enertech.fr

2.3.5 Electricité spécifique

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Esq. à DCE	BET fluides Maître d'ouvrage	Eclairage : dimensionnement et performance, autres : échanges et accompagnement des utilisateurs

❖ Définition

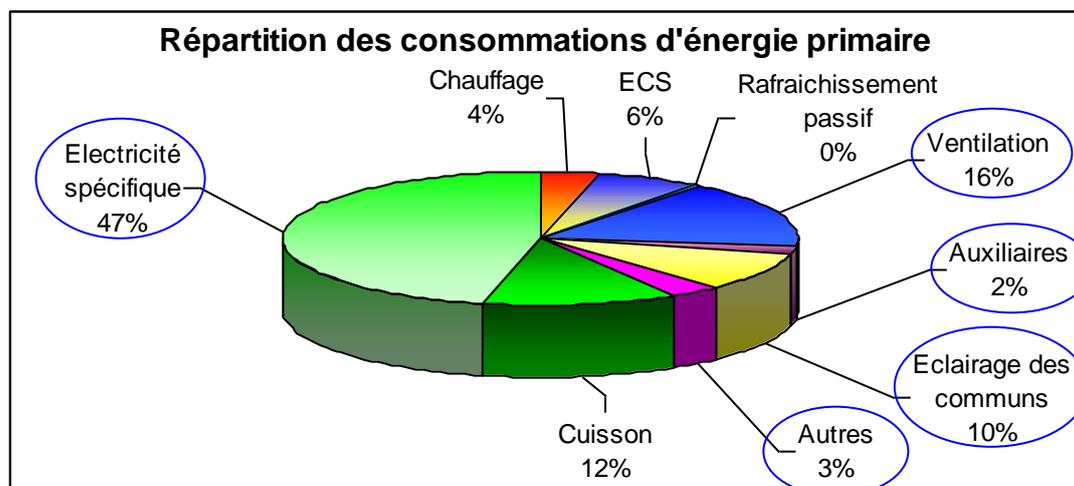
L'électricité dite « spécifique » regroupe **tous les usages qui ne peuvent fonctionner avec une énergie autre que l'énergie électrique**. Globalement, il s'agit de tous les appareils électriques, sauf ceux qui ne produisent que de la chaleur (chauffage, ECS, cuisson), que l'on peut générer par d'autres énergies.

Ce chapitre concerne donc l'éclairage, l'informatique et la bureautique, tout l'électroménager à l'exception de la cuisson, mais aussi tous les moteurs (pompes, ventilateurs,...), et les ascenseurs.

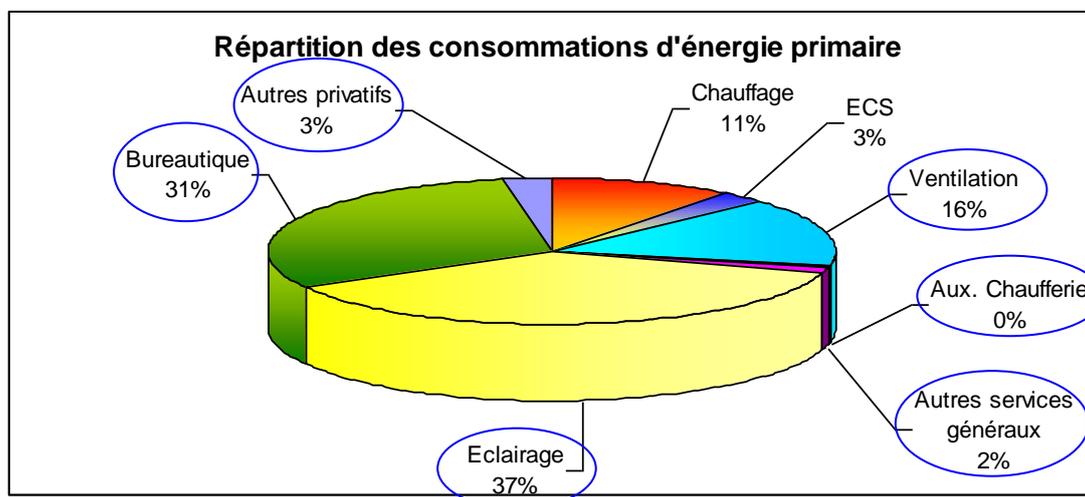
❖ Enjeux

Les consommations que nous venons d'évoquer dans les chapitres précédents (chauffage, ECS, ventilation) sont évidemment ceux sur lesquels le concepteur a le plus de moyens d'action.

Mais dans le cas de bâtiments très performants, ces consommations deviennent minoritaires (voire graphique ci-dessous). On s'aperçoit que l'enjeu s'est déplacé, et que **les consommations principales sont celles des usages spécifiques de l'électricité** (éclairage, électroménager, bureautique, moteurs, etc).



Exemple de répartition des consommations dans un logement collectif passif : les trois quarts des consommations d'énergie primaire sont des usages électriques spécifiques.



Exemple de répartition des consommations dans un bâtiment de bureaux passif : plus de 85% des consommations d'énergie primaire sont des usages électriques spécifiques.

❖ Eclairage

La première question à se poser sur l'éclairage est le **niveau d'éclairement à atteindre**. En effet, des associations de fabricants de luminaires comme l'AFE ont mis dans les esprits de nombreux concepteurs des niveaux d'éclairement très élevés, mais en aucun cas obligatoires.

On rappelle que seules la NFC 15-100, le code du travail, les réglementations PMR et ERP ont un caractère obligatoire. Les tableaux ci-dessous résument les principaux niveaux d'éclairement réglementaires :

Logement collectif :

Local	Eclairement requis [lux]	Source	Remarque
Circulations horizontales	Ext : 20	NF C15-100 / tableau 772A1	Eclairement moyen du cheminement extérieur accessible
	Int : 100	Article 10, annexe 6 à la circulaire interministérielle n° DGUHC 2007-53 du 30 novembre 2007	Eclairement moyen des circulations intérieures horizontales
	100 - 200		Halls d'entrée, interprétation de la NF C15-100
Locaux collectifs	100	Réponses M1 du site gouvernemental	A l'intérieur
Escaliers	150	http://www.accessibilite-batiment.fr/	Eclairement moyen au sol de chaque escalier
Parc de stationnement fermé	50		Circulations piétonnes
	20		Eclairement moyen tout autre point
	5	Non précisé dans les textes	Box privés (interprétation textes)
Ascenseurs	50	Norme ascenseurs EN80-x	Au sol des cabines
Chaufferies	100	NF C15-100 / tableau 772A2	Au niveau des appareillages
	200		Tableau (dans le plan du tableau)
	60		Autres
Locaux poubelles et deux roues	50	NF C15-100	

Etablissement recevant des travailleurs (ERT) :

Local	Eclairage requis [lux]	Source	Remarque
Bureaux	200 – 250	EN 12 464-1	Recommandation en base
	400 - 500		Recommandation sur le plan de travail
Circulations	100	Norme handicapés ERP	Dans les couloirs
	150		Dans les escaliers
Circulations	40	Code du travail	Au sol, en tout point
Entrepôts	60		Au plan de travail
Locaux de travail, vestiaires, sanitaires	120		Au plan de travail
Locaux aveugles affectés à un travail permanent	200		Au sol
Zones et voies de circulation extérieures	10		Au sol
Espaces extérieurs où sont effectués des travaux à caractère permanent	40		Au sol
Sanitaires	120		Au sol
Restauration	300	Non précisé dans les textes	Recommandation
Salle de cours	500	Non précisé dans les textes	Recommandation sur le tableau
	300		Recommandation sur les bureaux. 0,7 d'uniformité, UGR (indice d'éblouissement) max < 19
Locaux techniques	120	Code du travail	Au sol

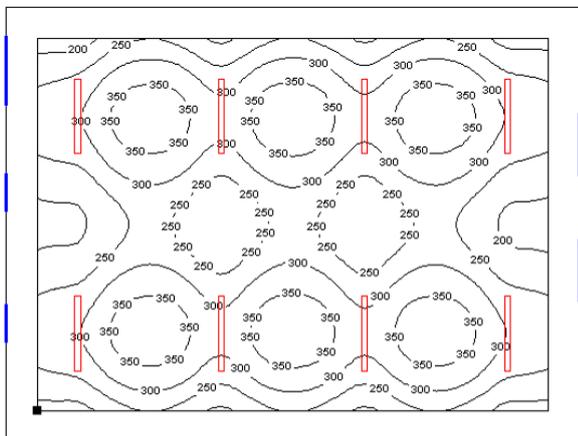
Etablissement recevant du public (ERP) :

Local	Eclairage requis [lux]	Source	Remarque
Cheminement extérieur accessible	20	Annexe 8 à la circulaire interministérielle n° DGUHC 2007-53 du 30 novembre 2007 Réponses M1 du site gouvernemental http://www.accessibilite-batiment.fr/	Au sol
Poste d'accueil	200		
Circulations intérieures horizontales	100		
Escaliers et équipements mobiles	150		
Parc de stationnement	50		Eclairage moyen des circulations piétonnes
	20	Eclairage moyen sur tout autre point	

Bonnes pratiques :

- ✓ Les dimensionnements d'éclairage sont à réaliser avec les logiciels comme Dialux, ou équivalents. Dans la pratique il convient également de préciser :
 - La hauteur du plan de travail où est calculé l'éclairage (généralement 80cm),
 - Le cas échéant, le périmètre à exclure pour les calculs d'éclairage et d'uniformité (souvent on peut exclure les 50cm en périphérie des pièces).
- ✓ On sélectionnera des **sources performantes** : tubes T5 avec ballast électronique, lampes fluo-compactes, LED, etc.
- ✗ Les halogènes, peu performants, seront proscrits.
- ✓ On sélectionnera des luminaires à **haut rendement optique** (>70%, et plus).

- ✓ Dans le cas des luminaires Led, la notion de rendements optiques n'est pas évidente. On vérifiera plutôt que le rendement du luminaire (le rapport du flux sortant sur la puissance totale comprenant les leds et l'alimentation) est supérieur à 80 lm/W.
- ✓ Afin d'obtenir une **bonne uniformité**, il est souvent utile de privilégier des luminaires de puissance unitaire moins élevée. Par exemple on arrivera à de meilleurs résultats avec des luminaires pour faux plafond 60x60cm en 3x14W qu'en 4x14W.



*Exemple de courbe isolux calculée sous Dialux.
Noter la bande neutre de 50cm en périphérie.*



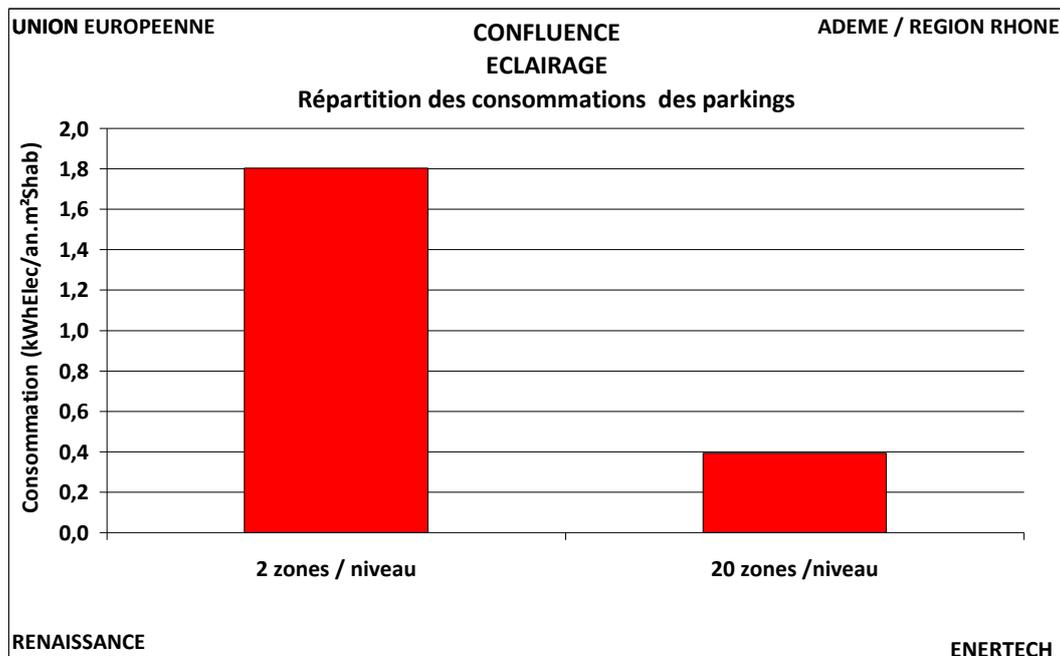
*Exemple de luminaire à haut rendement optique
3x14W avec tubes T5 et ballast électronique.*

- ✓ Pour les bureaux, l'éclairage d'appoint peut être réalisé par une lampe de bureaux. On pourra viser une puissance de moins de 10W, en source LED ou tube fluo. Prévoir un luminaire à éclairage direct, avec un bras articulé permettant des mouvements dans les trois axes.



*Ci-contre : exemple de lampe de bureaux à LED,
consommant moins de 10W (hors AAP).*

- ✓ **En extérieur**, la recherche de performance et d'uniformité conduit souvent vers des mats à LED. Ils sont plus chers à l'unité que des bornes, mais ils présentent de meilleurs rendements optiques utiles et leur hauteur permet une bonne uniformité, ce qui permet d'en réduire le nombre tout en respectant les 20 lux moyen des cheminements PMR (sur 1,4mètre de large seulement).
- ✗ **Attention aux sous-sols** qui sont souvent négligés par les concepteurs alors que pour un bâtiment de logement c'est le premier poste de consommation d'éclairage.
- ✓ Outre le juste dimensionnement des niveaux d'éclairement et le choix de luminaires performants, une mesure efficace consiste à **multiplier les zones de détection** (1 détecteur pour 5 luminaires maximum), d'utiliser des tubes LED et de régler la temporisation à 2 minutes. Le graphique suivant illustre les résultats que l'on peut obtenir :



Graphique issu d'une campagne de mesure sur l'éclairage des parkings (hors AAP) : on voit l'importance de prévoir un grand nombre de zones de détection indépendantes pour réduire le temps de fonctionnement de chaque luminaire.

❖ Les dispositifs de commande :

- ✓ La **détection de présence** permet, du moins en théorie, d'économiser sur le temps d'allumage des luminaires. Cela peut être vrai, mais nécessite certaines précautions :
 - **La temporisation doit être de courte durée.** Avec des temporisations observées dans le cadre des Appels à Projets en phase de mise au point de plus de 2 min, la détection de présence n'a plus aucun sens : mieux vaut alors prévoir des minuteries. Nous recommandons des temporisations de moins de 1 min pour les circulations, 2 min pour les parkings, et de 5 à 15 min pour les salles de classes ou bureaux.
 - Pour que la temporisation de courte durée ne soit pas gênante pour l'utilisateur, il convient de préconiser des détecteurs de présence performants et surtout de bien les positionner sur les plans.
 - **Attention aux veilles des appareillages :** gradateurs, détecteurs de présence ont une consommation propre qui peut dans certains cas anéantir l'économie d'énergie espérée. Veiller à ce que la consommation propre de ces équipements ne dépasse pas 1W.
 - Attention en particulier à l'utilisation des gradateurs sous protocole DALI qui engendre une veille de l'ordre de 0,6W par luminaire lorsque le gradateur n'est pas équipé d'une fonction spécifique permettant de couper ces veilles. A ce jour, la plupart des détecteurs de présence avec gradateurs DALI ne coupe pas la veille des luminaires. Ces veilles peuvent dépasser les consommations d'usage avec un détecteur sans gradateur.
 - Enfin, parfois la détection de présence force l'allumage alors que l'utilisateur ne l'aurait pas forcément souhaité, notamment en cas d'éclairage naturel.
- ✓ La meilleure solution semble donc à ce jour l'**allumage manuel par simple bouton poussoir** et **extinction automatique sur détection** de présence à faible temporisation.
- ✓ La **gradation** permet de moduler la puissance des luminaires en fonction de l'éclairage naturel. C'est là encore séduisant sur le papier, mais nécessite aussi des précautions :

- Un effet fréquemment observé dans les salles équipées de gradation est qu'on a l'impression que les luminaires sont éteints en présence d'éclairage naturel, et donc qu'on omette de les éteindre en quittant la pièce.
- Le niveau d'éclairage souhaité est sur un plan de travail ou au sol ; or les capteurs de luminosité sont en général au plafond. Ainsi un réglage fin semble difficile : en réglant simplement les détecteurs comme préconisé par les fabricants on observe des sur-éclairagements importants.

Ci-contre : gradateur et détecteur de présence



- Compte tenu de ces **difficultés de mise en œuvre**, d'un défaut très fréquent de réglage (voir chapitre 0 sur la Mise au point), et des consommations de veille, le bilan de la gradation est rarement positif en pratique. Une vraie réflexion sur la pertinence de cette solution doit être évaluée au cas par cas.
- Une solution qui semble plus « robuste » (et fortement encouragée par la RT2012) est de prévoir, dans les salles concernées, **deux circuits d'éclairage : l'un pour les zones proches des menuiseries, et un autre pour les zones ayant un moindre accès à l'éclairage naturel**. Les utilisateurs pourront ainsi n'allumer que les luminaires qui leur sont utiles. L'idéal étant de commander ces 2 rangées avec un seul détecteur de présence et de luminosité (pour couper la lumière une fois le seuil atteint) sur commande par bouton poussoir avec option allumage manuel et extinction automatique.

L'éclairage de sécurité :

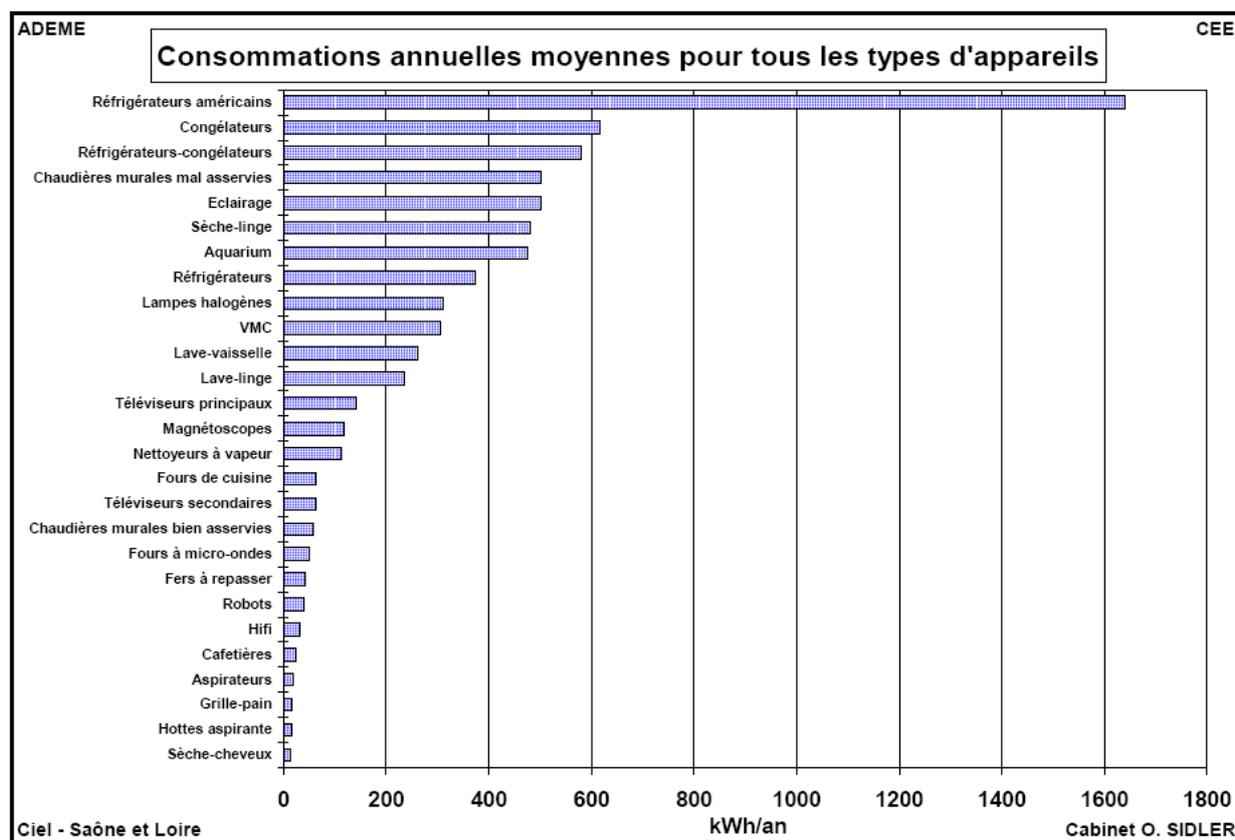
- ✓ Préconiser des **BAES/BAEH à basse consommation de charge** : il existe à présent plusieurs modèles à moins de 1 W de consommation permanente.



Ci-contre : BAES consommant 0,5 W en veille.

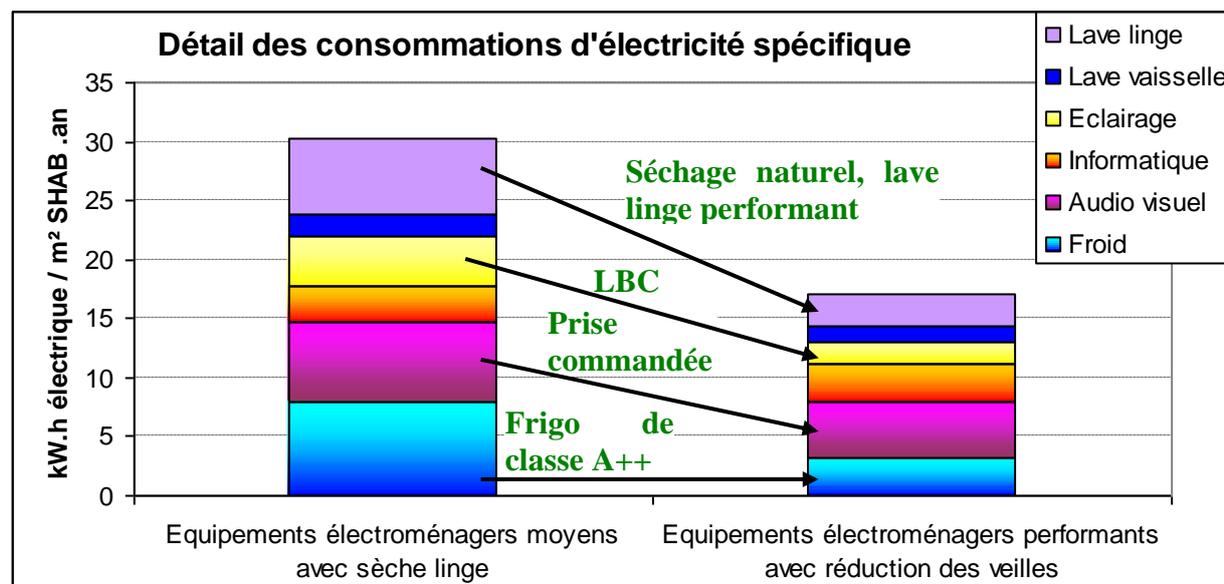
❖ *Electricité spécifique dans les logements*

Sujet inconnu il y a 20 ans, les campagnes de mesure ont permis depuis de discerner et de quantifier les enjeux de l'électricité spécifique :



Electroménager : consommations annuelles moyennes par type d'appareil en 2008 (hors AAP)

En partant de ce constat, des valeurs moyennes de consommations ont intégrées dans l'outil de calcul des consommations tous usages réalisé dans le cadre de l'Appel à Projets 2008 (voir § 2.3.8) :



Consommations d'électricité spécifique - Equipements électroménagers moyens avec sèche-linge et Equipements électroménagers performants avec réduction des veilles. (Outil de calcul des consommations tous usages de l'Appel à Projet 2008, réalisé par Eneritech sur la base de ses campagnes de mesures)

Bonnes pratiques

- ✓ **Le froid reste le principal poste de consommation** d'électricité spécifique dans les logements. Même si l'électroménager ne fait pas partie de la vente d'un logement, on peut envisager des solutions d'incitation à l'équipement en appareils de classe A++, par exemple une remise commerciale contre une preuve d'achat.
- ✓ Au niveau de l'aménagement des cuisines, ne pas placer côte à côte les appareils de froid et le poste Cuisson.
- ✓ 80 % des lave-vaisselle en vente aujourd'hui peuvent être alimentés en eau chaude. Prévoir donc systématiquement, dans les logements où la production ECS n'est pas électrique, une **double alimentation EF/EC** pour les lave-vaisselle. Enjeux : transfert de 180 à 200 kWh/an de l'électricité (effet Joule) à une production plus performante.
- ✓ Dans 99% des cas, il est possible d'asservir le **circulateur des chaudières individuelles** au thermostat d'ambiance. On trouvera sur le site internet d'Enertech les borniers électriques de 65 chaudières murales vendues en France avec toutes les indications permettant d'effectuer la modification très simple qui est nécessaire (moins de 5 minutes au total !). Enjeux : 230 à 350 kWh/an. Ceci ne concerne évidemment pas les projets avec chaufferie collective.
- ✓ Equiper tous les logements de **lampes fluocompactes**. Elles consomment 4 fois moins que les lampes à incandescence. L'enjeu est de 200 à 300 kWh selon les cas. Aujourd'hui il devient même intéressant d'aller vers les sources LED.
- ✓ La consommation des **sèche-linge** est une des consommations d'électricité les plus élevées des logements (500 kWh/an). Le développement de ces appareils, notamment en secteur social, est dû pour une part importante, à l'absence d'espace adapté au séchage naturel du linge. Construire des logements avec des espaces de séchage naturel (si possible extérieur au logement) semble une solution très économe. Enjeux : 500 kWh/an.
- ✓ On peut aussi imaginer des **espaces collectifs pour le lavage et le séchage du linge**. Ceci se pratique dans des pays peu suspects de collectivisme comme la Suisse, les Etats Unis et le Canada. Si ces pays le font, c'est probablement parce que c'est plus économique !



Laverie collective réalisée dans le cadre des Appels à Projets



Même laverie collective – espace de séchage fortement aéré avec bardage bois ajouré

- ✓ Pour éliminer **les veilles du site audiovisuel** (jusqu'à 850 kWh/an) il faut débrancher chaque jour l'ensemble des prises alimentant le magnétoscope, la TV, Canal +, etc. Pour faciliter cela, il était demandé dans les Appels à Projets de disposer d'une prise de courant (toujours prévue à proximité de l'antenne TV) commandée par un interrupteur placé à l'entrée de la pièce. En sortant le soir l'utilisateur pourra ainsi couper d'un geste simple les veilles audiovisuelles en même temps que la lumière. Les retours récents de campagne de mesure sur cette disposition sont les suivants :

- Le fonctionnement de cette prise commandée n'est pas toujours bien comprise : il est impératif que la prise et l'interrupteur soient différenciés (par exemple par une couleur différente) et que l'intérêt de la mesure soit explicité ;
- Dans les logements où elle était utilisée, cette prise commandée a permis 80% d'économies sur les veilles (retour de campagne de mesure, hors AAP) ;
- Dans beaucoup d'autres opérations, la prise commandée n'a pas été utilisée, par incompréhension ou par manque d'intérêt ;

Il faut également souligner que, suite à une réglementation européenne, les consommations de veille des appareils audiovisuels sont aujourd'hui très faibles sur les appareils neufs. L'intérêt de cette mesure est donc moins important aujourd'hui qu'en 2008 où les veilles étaient encore très consommatrices.

❖ Bureautique

La bureautique est l'un des plus importants postes de consommation d'énergie dans les bâtiments tertiaires.

Les choix en la matière sont portés par le Maître d'ouvrage, mais ils sont structurant pour la conception, et doivent être discutés avec la Maîtrise d'œuvre dès les premiers stades de la conception. En effet, pour tous les projets, **la puissance des équipements informatiques est un enjeu capital** pour le confort d'été : réduire les consommations de la bureautique, c'est améliorer à la fois la performance et le confort d'été !

Pour les bâtiments visant le niveau énergie positive, un échange entre Maître d'ouvrage et Maître d'œuvre est encore plus important, car en dépendra de plus l'ensemble de la conception énergétique (doit-on continuer à se battre pour gagner quelques kW.h/m² sur le chauffage alors que le gisement d'économie est énorme sur l'informatique ?)

Bonnes pratiques

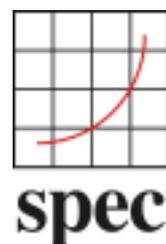
- ✓ Les ordinateurs fixes consomment beaucoup plus que les **ordinateurs portables** : plus de 100W pour un poste fixe, et 25W et moins pour des portables avec écran 15 pouces. On orientera donc autant que possible le choix vers des ordinateurs portables de taille raisonnable.
- * Attention : tous les ordinateurs portables ne sont pas performants ! Le marché propose de nombreux modèles dont les consommations varient de façon considérable, indépendamment de leurs performances informatiques et de leur prix. On pourra se baser sur les valeurs mesurées par le label Energy Star. On pourra par exemple se fixer le critère d'un maximum de 15W en « Idle mode » selon les tests Energy Star.
- ✓ Ces ordinateurs portables peuvent selon les besoins être équipés :
 - D'une station d'accueil, permettant de reconnecter facilement tous les périphériques après un déplacement ;
 - D'un antiviol pour les applications concernées (enseignement, médiathèques...) ;
 - D'un écran LCD de plus grande taille pour les usages de CAO, DAO, etc.
- ✓ Tous les ordinateurs portables possèdent des fonctions de veille, qu'il convient de paramétrer sur des durées courtes (arrêt très rapide de l'écran, puis arrêt du disque dur, veille prolongée).



- ✓ Nos campagnes de mesure indiquent que **de nombreux ordinateurs ne sont jamais éteints**. Plusieurs mesures peuvent être prises :
 - coupure de toutes les prises de courant du bâtiment par un asservissement à l'alarme anti intrusion à l'exception d'une prise par pièce clairement identifiée. Cette mesure réduit également les risques d'incendie ;
 - sensibilisation des usagers ;
 - mise en œuvre d'un logiciel spécifique sur le serveur pour régler sur tous les postes : la mise en veille au bout de 10 min, l'extinction à heure fixe, l'allumage pour la maintenance informatique.

Enjeux : 120 kWh par an de gain par poste informatique (valeur calculée à l'issue d'une campagne de mesures d'Enertech sur 149 postes informatiques, hors AAP).

- ✓ L'autre avantage des portables est qu'ils ne nécessitent pas d'onduleur. Celui-ci sera ainsi réservé aux serveurs.
- ✓ Le serveur sera également choisi en fonction de sa performance énergétique. La Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC)²⁶ qui est une association américaine indépendante, mesure la consommation et compare la performance des serveurs. La publication de nouveaux résultats a lieu tous les trimestres. Ainsi les directions informatiques peuvent comparer les performances énergétiques avant de commander de nouveaux serveurs.



- ✗ Attention, **le rendement d'un onduleur chute fortement s'il est surdimensionné** : il est donc important de choisir un onduleur adapté à la puissance des appareils qui y seront raccordés (donc peu d'appareils si l'essentiel du parc est constitué de portables).
- ✓ De même que pour les ordinateurs, **l'ensemble des appareils de bureautique (imprimantes, photocopieurs, fax, etc.) comportent généralement des fonctions de veille**. Il suffit de les paramétrer pour réaliser d'importantes économies !
- ✓ Lors de l'acquisition de nouveaux équipements, on veillera à ce qu'ils disposent du label Energy Star, qui assure l'évaluation des consommations et l'existence de ces fonctions de veille.

NB : compte tenu des impacts (énergie grise notamment) de la fabrication des appareils électroniques, il n'est pas recommandé de remplacer un parc informatique pour la seule raison énergétique. En effet, l'énergie grise d'un ordinateur représente plusieurs dizaines d'années de consommation en fonctionnement. Il est donc recommandé de profiter d'un remplacement du parc pour sa vétusté pour passer à un parc plus performant.

❖ Auxiliaires

Consommation des ventilateurs : voir partie 2.3.2 Ventilation.

Consommation des pompes : voir partie 2.3.3 Chauffage.

²⁶ http://www.spec.org/power_ssj2008/results/

❖ Ascenseurs

Les constructeurs d'ascenseurs ont réalisé de nombreux progrès les dernières années.

Ainsi les motorisations avec réducteur ont été remplacés par des systèmes « gearless » (sans engrenage), ce qui permet de d'affranchir des pertes des engrenages (rendement souvent entre 50 et 60%).

De même, les moteurs à variation de vitesse se sont imposés, principalement pour le confort des utilisateurs, mais avec également une réduction des consommations (de 50 à 70%).

Pour autant, il reste encore des points de vigilance à prendre en considération lors de la conception :

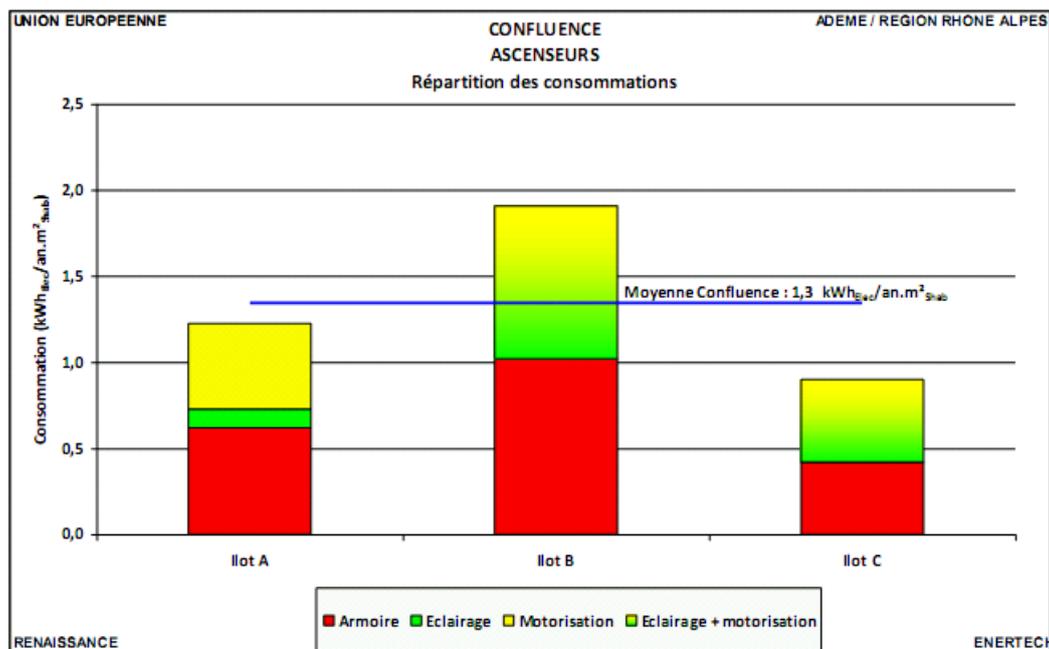
Bonnes pratiques

- ✗ **Eviter les ascenseurs à vérin hydraulique**, très énergivores, au profit d'ascenseurs à câbles et contrepoids.
- ✓ **Préconiser les motorisations gearless et à variation de vitesse**. Afin que les économies d'énergie riment avec économie de charges, bien prendre en compte l'abaissement de la puissance maximale appelée par ce type d'ascenseur, dans le calcul des abonnements.
- ✓ **Asservir l'éclairage des cabines à la présence d'utilisateurs**. Selon la norme EN 81-1 de 1998 § 8.17.3, la cabine doit être continuellement éclairée lors de son utilisation ; dans le cas de portes automatiques la lumière peut être éteinte lorsque la cabine reste stationnée au palier portes fermées. Les constructeurs ne se sont pas encore beaucoup préoccupés de ce sujet, mais il suffit de placer un détecteur de présence dans la cabine en attendant que la gestion de la présence soit effectuée directement depuis l'armoire. L'enjeu énergétique dépend bien sûr de la puissance installée. Les consommations observées pour l'éclairage des cabines allaient de 160 à 875 kWh/an/cabine. Cette solution est très bon marché et son temps de retour très court. Elle doit être encouragée et devrait même être rendue obligatoire.
- ✗ Attention également à **l'éclairage de la gaine d'ascenseur** : si elle est laissée en commande manuelle, il y a un risque fort qu'elle reste allumée entre deux visites du technicien... (constaté lors de visites dans le cadre des Appels à Projet, et observé dans le cadre de campagnes de mesures). Solution proposée : éclairage simple allumage lorsque la protection travailleur est activée et allumage temporisé 30 min en fonctionnement normal.

Ci-contre : photo de nuit d'une cage d'ascenseur vitrée laissée allumée.



- ✓ La récupération d'énergie au freinage, avec réinjection sur le réseau est une piste très intéressante pour réduire encore les consommations de ce poste.
- ✓ Une piste encore plus efficace (à ce jour), et moins connue, est de sélectionner une masse de contrepoids à 30% de la charge maximale en plus de la masse de la cabine au lieu des 50% usuellement constaté. En effet, la grande majorité des usages se font à vide ou avec un ou deux personnes, et non à 50% de la charge. On réduit ainsi fortement les consommations en optimisant l'équilibre du contrepoids pour les charges les plus courantes.
- ✓ Attention, pour des utilisations moyennes (hors Immeubles de Grande Hauteur) la **veille de l'armoire électrique** dépasse souvent la consommation de la motorisation (graphique ci-dessous). Il faut donc veiller au classement de l'ascenseur selon la norme VDI 4707 pour la veille en s'assurant que l'ascenseur est de classe A.



Mesure des consommations des ascenseurs sur 3 opérations récentes de logements collectifs à Lyon (hors AAP), en kWh d'électricité par m² habitable. On note la part importante de la consommation de l'armoire de commande de l'ascenseur.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Electricité spécifique			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Eclairage	Incandescent, halogène. Eclairage permanent, en particulier du sous-sol	Dimensionnement Dialux Sources performantes et luminaires à haut rendement. Multiplier les zones de détection en sous sol.	Allumage manuel, extinction automatique. Zonage selon apports solaires.
Electricité privative des logements	Poste froid à côté du poste cuisson.	Alimentation EF+ECS pour les lave-vaisselle. Pré-équiper en lampes basse consommation.	Laverie collective et espace de séchage.
Bureautique	Ordinateurs fixes, onduleur surdimensionné.	Portables de taille raisonnable. Gestion des veilles de tous les appareils	Coupure des prises sur alarme anti intrusion ou logiciel de gestion des extinctions de PC
Ascenseurs	Hydraulique	Gearless et variation de vitesse. Eclairage asservi (cabine et gaine). Veille de classe A selon norme VDI 4707.	Récupération d'énergie (sous réserve de faible consommation de l'armoire de commande)

❖ *Pour aller plus loin*

- Enjeux et notes techniques sur l'électricité spécifique sur <http://www.enertech.fr/rubrique-La+Ma%C3%A9trise+de+la+Demande+d%27Electricit%C3%A9-42.html#page>

2.3.6 L'intégration des énergies renouvelables

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Esq. à DCE	BET fluides Architecte	Solaire thermique : éviter les surchauffes Toutes : anticiper la maintenance

❖ *Enjeux*

Aujourd'hui le recours aux énergies renouvelables est souvent nécessaire pour atteindre les niveaux de performance visés, ne serait-ce que pour respecter la RT2012. En particulier, le recours aux énergies renouvelables est rendu obligatoire pour les maisons individuelles ou accolées par l'article 16 de la RT2012.

Dans le présent chapitre nous évoquerons les principales énergies renouvelables rencontrées dans le cadre des Appels à Projets : ainsi les micro-cogénérations, et pompe à chaleur à gaz ne seront pas évoquées ici.

La récupération de chaleur sur eau grise et sur groupe froid, sans être stricto-sensu des énergies renouvelables, sont tout de même évoquées dans cette partie.

❖ *Bonnes pratiques*

Solaire thermique



Installation solaire collective



Installation solaire thermique auto-vidangeable pour le chauffage et l'ECS en maison individuelle

- ✗ **La surchauffe des capteurs** est une problématique récurrente avec les installations solaires : bien souvent les capteurs surchauffent au mois d'août, lorsque l'ensoleillement est maximum et que les puisages sont au minimum. Les effets sont les suivants :
 - Le glycol est dégradé par les surchauffes, et il perd son pouvoir antigel ;
 - L'installation perd du liquide par les soupapes de pression : une intervention de la maintenance est nécessaire pour remettre de l'eau glycolée (pas de l'eau pure !). Si cette

action n'est pas réalisée, l'installation peut rester en défaut et ne plus rien produire sans que personne ne s'en aperçoive (voir aussi à ce sujet le § 0)...

- ✓ Afin d'éviter ce risque de surchauffe, mieux vaut ne pas surdimensionner les champs de capteurs. En production d'ECS avec des capteurs traditionnels, on recommande :
 - Pas plus de 1,5 m² de capteur par logement en collectif ;
 - 2,5 m² suffisent en général pour une maison individuelle (avec des usages sobres).
- ✓ Les capteurs autovidangeables permettent de s'affranchir du risque de surchauffe, ce qui rend possible des surfaces de capteurs plus importantes, pour un plus fort taux de couverture solaire (en dégradant la rentabilité de l'installation), ou pour contribuer au chauffage par exemple.
- * Attention dans le cas particulier du solaire autovidangeable au dimensionnement de la pompe, et donc à la position du vase de récupération du caloporteur : en effet, la pompe va être dimensionnée pour remonter toute la hauteur entre ce vase et les capteurs : une telle hauteur en logement collectif ne permet rapidement plus le recours à une pompe performante (souvent limitée à 10 ou 12 mCE), et va donc induire des consommations électriques importantes.
- ✓ Pour résoudre cet inconvénient, on peut placer un local technique à proximité des capteurs : au niveau de la toiture ou au dernier étage. La consommation des auxiliaires sera alors fortement réduite.
- ✓ Dans tous les cas, bien s'assurer de l'**accessibilité des organes actifs de l'installation solaire**, afin de faciliter la maintenance.
- ✓ Afin de récupérer l'eau glycolée, bien raccorder les purgeurs à un bidon de récupération. En effet le glycol est très cher et par ailleurs très polluant : il mérite donc cette attention.
- ✓ Bien prévoir le calorifuge performant et exhaustif de tous les organes de l'installation solaire. Les pertes de la boucle primaire solaire sont malheureusement souvent non négligeables. Prévoir une protection adaptée en toiture (contre les UV et les oiseaux).

Solaire photovoltaïque



Importante installation photovoltaïque sur des ateliers techniques



Installation solaire thermique et photovoltaïque sur une maison individuelle

- ✓ Choisir un onduleur de rendement européen certifié supérieur à 95%. (le rendement européen permet de prendre en compte la variation d'ensoleillement au cours de l'année : c'est donc une moyenne des rendements de l'onduleur à différents taux de charge, pondérée par la fréquence d'occurrence)

- ✓ Idéalement les onduleurs seront placés dans un local de grande taille et frais typiquement dans un sous sol. Eviter la position dans des combles mal ventilées, car les surchauffes dégradent le rendement de l'onduleur et réduisent sa durée de vie.
- ✓ En revanche, ne pas placer les onduleurs dans un local climatisé : le gain en rendement est perdu par la consommation de la climatisation. Préférer un local sur-ventilé naturellement.
- ✓ Les conducteurs Aller et Retour des panneaux photovoltaïques doivent être rapprochés de façon à éviter de créer une boucle d'induction. Ces boucles d'induction peuvent en effet attirer la foudre. Le guide UTE NF C 15 712 spécifie les impératifs à ce sujet.
- ✓ Sécurité en cas d'incendie : Le courant continu sortant des panneaux photovoltaïques possède des tensions très élevées de l'ordre de 600V ce qui induit un risque d'électrocution important en cas de contact direct. Le guide UTE C15-712-1 précise les mesures à mettre en place pour limiter les risques de choc électrique et d'incendie :
 - L'isolation renforcée du circuit à courant continu (Classe 2)
 - La mise à la terre des cadres métalliques des modules PV,
 - Toutes les installations photovoltaïques comportent 2 coffrets de coupure avec arrêt pompier. L'un est placé au plus proche du champ en toiture, l'autre est situé à proximité de l'onduleur.
 - Etc...

Plus d'informations sur <http://www.photovoltaique.info/Prevention-contre-les-chocs.html>

Bois énergie

Bûches, plaquettes ou granulés ? Ces trois formes de bois se distinguent par leur densité énergétique, leur coût, par la possibilité d'automatisation, et par leur coefficient d'énergie primaire non renouvelable (EPNR) :

	Contenu énergétique	Coût	Automatisation	kW.h _{EPNR} / kW.h _{final} Source : ²⁷
Bûches	1500 à 2000 kW.h par stère (m3 apparent)	Particuliers : env. 4 c€/kW.h	Difficile.	0,04 à 0,06
Plaquettes	750 à 1000 kW.h par m3 apparent, soit environ 4000 kW.h par tonne à 20% d'humidité.	Environ 2 c€/kW.h	Silo et chaudière automatique.	0,09
Granulés	3000 kW.h par m3 apparent, soit 4600 kW.h par tonne.	En sac : env. 7 c€/kW.h Livré en vrac : env. 5 c€/kW.h	Silo et chaudière automatique / Poêle : remplissage manuel du réservoir.	0,24

- ✓ Les **bûches** sont peu pratiques pour les projets tertiaires ou en collectif. C'est en revanche une solution simple et peu coûteuse en maison individuelle.
- ✓ Les **plaquettes**, ou bois déchiqueté, est la forme la moins chère, mais elle nécessite le plus gros volume de stockage et le plus gros investissement initial (silo compris). Le choix de cette énergie est généralement plutôt fait pour des chaufferies de forte puissance.
- ✓ Les **granulés** offrent la plus grande densité énergétique en termes de volume de stockage. L'automatisation est variable, du poêle à granulé à chargement manuel, à la chaufferie automatique. C'est en revanche la forme d'énergie bois la plus chère et la plus coûteuse en énergie primaire non

²⁷ Valeurs des coefficients "physiques" calculées à partir :

- des inventaires du cycle de vie (ICV) ecoinvent v2.2 valides pour la France ou adaptés au contexte français par Cycleco,
- de la méthode d'évaluation d'impact Cumulative Energy Demand telle qu'implémentée par ecoinvent center dans ecoinvent v2.

renouvelable (toutes proportions gardées : on reste tout de même très inférieur aux 3,27 de l'électricité ou aux 1,16 du gaz naturel - valeurs selon source ²⁷).

Pour les maisons individuelles :

- ✓ Le poêle à bois, sous toutes ses formes (bûches, granulés, bouilleur ou non...), est une solution simple et peu chère pour une maison individuelle.
- * En construction neuve, la réglementation thermique impose un appoint si la surface habitable dépasse 100 m² (article 24 de la RT 2012). Cette valeur ne dépend pas de la performance de l'enveloppe ni du type de ventilation, ce qui semble peu logique.
- ✓ Dans la pratique, une ventilation double flux contribue de façon importante à répartir la chaleur dans une maison compacte. On s'assurera tout de même que le poêle est à l'étage inférieur (pour que la chaleur monte), dans le séjour en position assez centrale. Dans cette configuration et avec une ventilation double flux, on observe une différence maximale d'un ou deux degrés entre le séjour et les chambres.
- ✓ On veillera aux critères de choix suivants :
 - Choisir une **faible puissance** : 2 ou 3 kW suffisent ! Un poêle surdimensionné va mal fonctionner, avec un rendement dégradé, et va s'encrasser plus vite ;
 - Le poêle ainsi que son conduit de fumée doivent être **étanches à l'air**. Ce critère exclu les inserts (en l'état actuel du DTU, il n'est pas possible de réaliser une pose étanche) ;
 - Il doit être **raccordé sur l'air extérieur** (indépendant de l'air intérieur). En pratique on peut utiliser soit un conduit d'amenée d'air raccordé à l'extérieur, soit un conduit de fumée « double flux » intégrant cette amenée d'air depuis la toiture ;
 - En construction neuve, la RT2012 demande que le poêle soit équipé d'une régulation automatique en fonction de la température intérieure (article 24). Ceci limite fortement le choix de poêles à bûches : il existe cependant des modèles avec régulation thermostatique. Cette contrainte ne s'applique pas en rénovation.



Poêle à bois (bûches) bouilleur

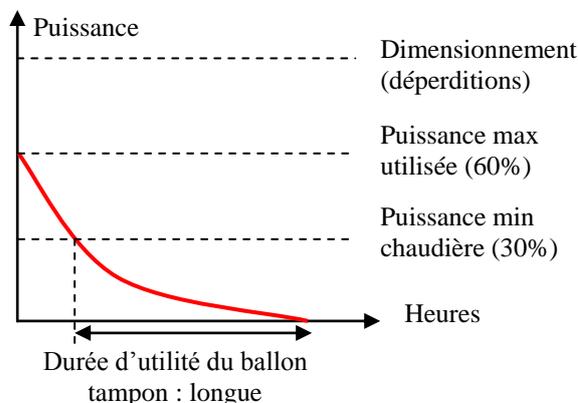
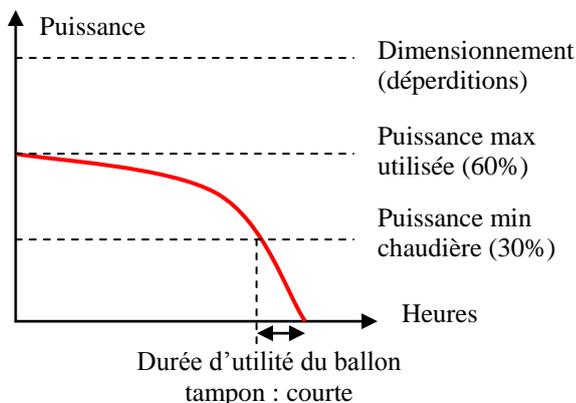


Chaudière à granulés

Pour les chaufferies en collectif ou en tertiaire :

- ✓ Compte tenu de la fiabilité des chaudières actuelles, il ne semble plus nécessaire de prévoir une chaudière de secours.
- * Le surdimensionnement des chaudières est particulièrement nuisible pour les chaufferies bois. La dégradation du rendement, et les problèmes d'encrassement sont très sensibles.

- ✓ Pour les chaudières non modulantes, un **ballon tampon** est nécessaire pour éviter des cycles courts d'allumage-extinction.
- ✓ Pour les chaudières modulantes, certains fabricants déconseillent la mise en œuvre de ballon tampon. Pourtant, il faut intégrer le fait que les courbes de fréquences cumulées de puissances appelées sont très différentes sur un bâtiment à basse consommations, par rapport à un bâtiment traditionnel :



Fréquences cumulées des puissances de chauffage pour un bâtiment classique : le nombre d'heures sous la puissance minimale de la chaudière modulante est faible : ballon tampon inutile.

Idem pour un bâtiment BBC : le nombre d'heures sous la puissance minimale de la chaudière modulante est majoritaire : un ballon tampon est utile.

Le ballon tampon s'avère ainsi souvent utile dans le cas des bâtiments performants.

Silo de stockage :



Désileur pour bois déchiqueté



Silo en structure bois pour granulés

- ✓ La conception fonctionnelle d'un silo bois et de son environnement est essentielle pour le bon fonctionnement de l'installation :
 - Pour un approvisionnement en bois déchiqueté, bien prévoir l'espace pour la manœuvre des camions ;
 - Pour un silo à granulés, il y a moins de contraintes. On parle généralement d'une distance de 20m maximum pour la livraison. Prévoir au moins deux conduits de soufflage, afin de permettre l'aspiration des poussières (les camions de livraison récent sont équipés). Attention à limiter le nombre de coudes, pour ne pas réduire les granulés en poussière...

- Pour le bois déchiqueté également, la livraison par soufflage commence à se développer. Se renseigner sur les filières locales toutefois.
- ✓ Le silo doit évidemment être et rester sec...
- ✗ Attention aux trappes de livraison pour les plaquettes : prévoir une isolation ou une pente pour éviter que la condensation sous la trappe ne retombe sur le bois.

La chaudière bois du futur...

- ✓ ... sera à condensation ! Des modèles existent déjà outre-Rhin et arrivent en France. Cette perspective technique est une révolution pour les rendements de chaudières, car la condensation permettra de récupérer l'énergie de l'eau créée par la combustion, mais surtout de récupérer en grande partie l'énergie dépensée pour évaporer l'eau contenue dans le bois.

Évaluation économique en coût global d'une chaufferie bois :

Dans la comparaison entre les différentes solutions énergétiques, il convient de prendre en compte les frais de maintenance propres aux chaufferies bois. Même si la fiabilité des machines est aujourd'hui très bonne, les entreprises de maintenance appliquent toujours des tarifs élevés, et souvent non différenciés entre bois granulés et plaquettes (le travail n'est pourtant pas le même !). Voir aussi le § 3.5.3.

A contrario, on souligne l'intérêt économique important de l'absence d'abonnement pour l'approvisionnement en bois. Ces aspects sont à prendre en compte dans l'étude de choix énergétique, en coût global, au stade APS ou APD.

Pompes à chaleur

Voir § 2.3.3 pour les bonnes pratiques sur le chauffage avec PAC.

Le présent paragraphe se concentrera plutôt sur la génération d'ECS par PAC (ballons thermodynamiques) :

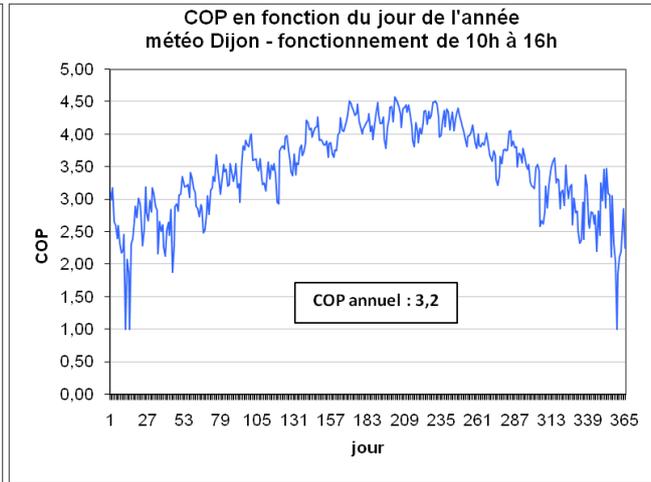
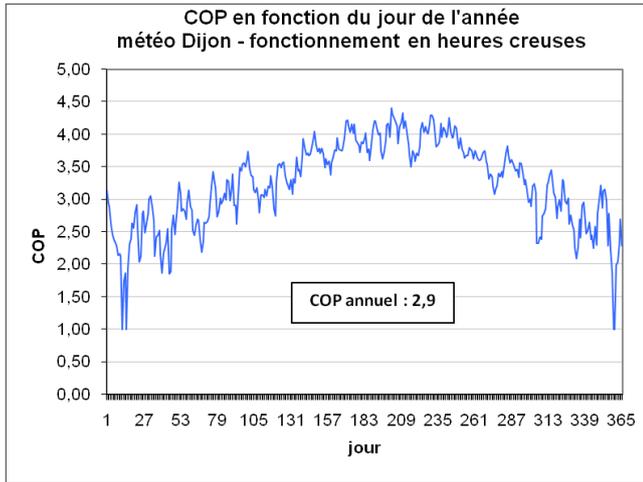


Ballon thermodynamique sur air



Capteurs aéro-solaires pour génération ECS individuelle par pompe à chaleur

- ✓ Les solutions de ballons thermodynamiques sont intéressantes, notamment dans la recherche de solutions simples en maison individuelle. Sur air extérieur, compte tenu de la variation du COP en fonction de la température extérieure, on peut attendre un COP moyen annuel compris entre 2,5 et 3,5 pour une production à 45°C.



Calcul théorique du COP moyen annuel d'un ballon thermodynamique sur air extérieur, pour le climat de Dijon, et pour une production à 45°C. Comparaison du fonctionnement en heures creuses (de nuit) et entre 10 et 16h : gain de 0,3 points de COP.

- ✓ On note avec les calculs ci-dessus qu'il est intéressant pour optimiser le COP du ballon thermodynamique de le programmer sur horloge pour qu'il fonctionne non pas sur heures creuses, soit la nuit quand l'air extérieur est froid, mais au contraire aux heures les plus chaudes de la journée.
- ✗ Attention cependant, une production à 45°C est insuffisante pour éliminer complètement le risque de légionnelle. Or si on souhaite dépasser cette température, c'est l'appoint électrique (par effet Joule) qui va prendre le relais. **Il en résulte une dégradation importante du « COP moyen »**. Dans l'exemple ci-dessus avec un asservissement sur horloge entre 10 et 16h :

Consigne d'ECS	45	50	55	°C
COP moyen	3,2	2,5	2,1	

On voit que la dégradation du COP moyen est très rapide, dès 50°C. La performance est donc très sensible à la consigne donnée au ballon, et donc à l'importance que l'on donne à la problématique de la légionnelle...

On souligne qu'un COP de 2,1 sur une consommation d'électricité avec un facteur d'énergie primaire de 3 ne représente aucun gain énergétique par rapport à une chaudière double service gaz qui aurait un rendement de 70%. C'est même moins intéressant qu'un préparateur instantané gaz, qui aurait un meilleur rendement et aucune perte de stockage.

- ✓ Les calculs ci-dessus sont faits pour un ballon thermodynamique raccordé sur l'air extérieur. Il est toutefois possible de le **raccorder sur l'air du logement, ou celui d'un local non chauffé** comme un garage. Le COP est alors grandement amélioré, avec toutefois la même problématique de consigne de température.
- ✗ A noter également que les ballons thermodynamiques génèrent un **bruit assez important** (de 47 dB à plus de 50 dB). Ceci est particulièrement sensible si on le raccorde sur l'air intérieur. Ceci renforce d'ailleurs l'intérêt de programmer le ballon sur un fonctionnement de jour, et non de nuit...
- ✓ Il existe aussi des systèmes thermodynamiques basés sur d'autres sources, comme des capteurs aéro-solaires. Ceci permet d'envisager des performances intéressantes.
- ✗ Attention cependant, le système présenté en photo ci-dessus, suivi dans le cadre des Appels à Projets, comportait une liaison frigorifique du ballon au capteur, avec un risque de fuites du fluide frigorigène. De telles fuites réduiraient à néant l'intérêt environnemental de la solution, compte tenu

du fort GWP (pouvoir de réchauffement climatique) des fluides frigorigènes couramment utilisés à ce jour.

Récupération de chaleur sur eaux grises et sur groupe froid :

Comme indiqué en introduction, ces systèmes ne sont pas vraiment des énergies renouvelables, mais relèvent de la récupération de chaleur « fatale ».



Récupération de chaleur sur chutes eaux grises (calorifugé)



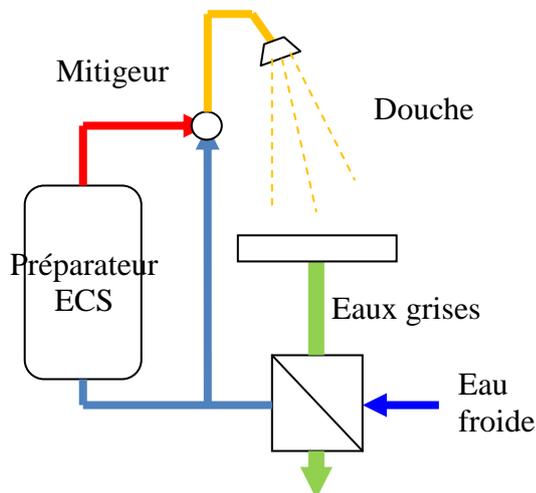
Récupérateur sur eaux grises avec stockage (avant calorifugé)



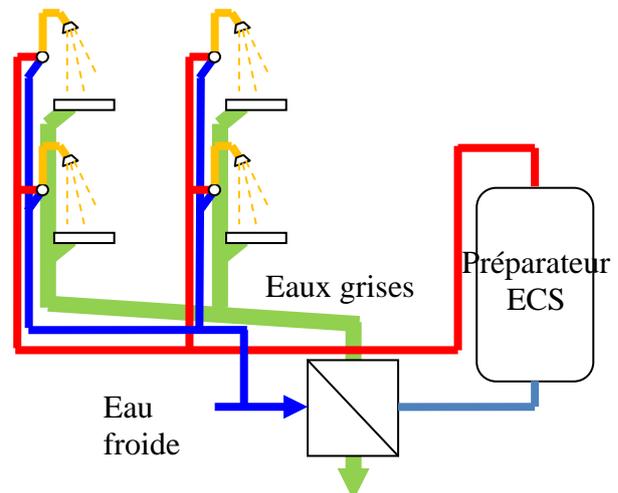
Récupération de chaleur sur groupe froid

✓ La récupération de chaleur sur les eaux grises est une idée très séduisante : il s'agit de préchauffer l'eau froide à partir des eaux usées en provenance principalement des douches. On distingue plusieurs types de récupération :

- **Echangeur statique instantané** une chute d'eau usée verticale : il s'agit d'un serpentin en cuivre autour d'un tronçon de chute lui aussi en cuivre. C'est un système très simple et robuste (aucun entretien). Il nécessite pour être mis en place 1 à 2 m de chute verticale.



Principe de la récupération de chaleur instantanée intégrée à une chute d'eau usée ou sous bac en maison individuelle, avec équilibre des débits



Exemple de principe de récupération collective sur un collecteur d'eaux grises.

L'efficacité maximale est atteinte si les débits d'eau froide et d'eau usée sont équilibrés : ceci suppose de préchauffer à la fois l'eau froide en amont du préparateur ECS et l'eau froide utilisée au mitigeur de la douche... ce qui est concevable en logement individuel, mais devient complexe avec une génération ECS collective. S'ajoute à ceci le risque de légionnelle

si on préchauffe de l'eau froide de la douche, sans passer ensuite par un ballon à une température suffisante.

En logement collectif, on peut regrouper les eaux grises sur une batterie d'échangeurs. Ceci permet un effet de foisonnement sur les arrivées d'eau grise. En revanche, seule l'eau froide pour la préparation d'ECS est préchauffée

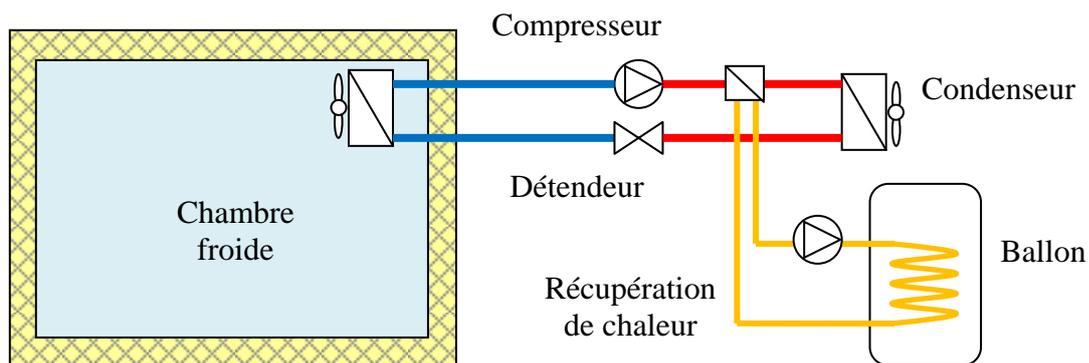
- Echangeur statique instantané **intégré à un bac à douche** : il s'agit d'un échangeur placé sous ou à côté du bac à douche. La remarque précédente sur l'équilibre des débits s'applique également : c'est faisable en maison individuelle, mais compliqué en collectif. Dans ce dernier cas on ne peut préchauffer que l'eau froide avant mitigeur, avec un déséquilibre de débits important.
- **Echangeur statique avec stockage** : le principe est le même que le second schéma présenté ci-dessus, avec l'avantage de ne pas compter que sur un foisonnement statistique pour que le débit d'eau froide dans le récupérateur soit simultané avec le débit d'eau grise, mais en s'appuyant sur un stockage d'eau froide préchauffée.

Ce type de récupérateur inclut un système de nettoyage automatisé. Une maintenance semble toutefois à prévoir.

- On peut aussi envisager la récupération de chaleur avec **pompe à chaleur sur stockage d'eaux grises**. Cette solution a été testée avec succès sur un hôtel en région Lyonnaise (hors Appels à Projets).
- ✓ Ces solutions impliquent de séparer les chutes d'eau grises (douches) des autres chutes, et de calorifuger ces évacuations. Les conduits en fonte sont à éviter, car ils génèrent un déphasage entre le puisage d'eau chaude et l'arrivée d'eau grise chaude au récupérateur.

Récupération sur groupe froid :

- ✓ Cette solution consiste à préchauffer de l'eau froide sur le circuit de refroidissement du groupe froid d'une chambre froide. Très schématiquement, le principe est le suivant (il y a plusieurs variantes possibles en termes de nature et de positions des échangeurs) :



Exemple de schéma de principe de récupération de chaleur sur groupe froid

Cette solution a été mise en œuvre sur une opération suivie dans le cadre des Appels à Projet. La récupération alimente un ballon qui sert à la production d'ECS et de chauffage.

NB : malheureusement, malgré des opérations pilotes réalisées avec ces équipements dans le cadre des Appels à Projets, nous n'avons pas de retour d'expérience concret de la récupération de chaleur effective

sur ces opérations. En effet, lors des dernières visites sur chacun des sites concernés, il subsistait des problèmes de mise en service ou de comptage de chaleur, ne permettant pas d'établir un bilan.

Les premiers bilans sur récupérateurs statiques sur chutes hors Appels à Projets indiquent un taux de couverture des besoins d'ECS de l'ordre de 10% (compte tenu du fait que tous les puisages ECS ne sont pas des douches, donc tout n'est pas récupérable, du déphasage et du déséquilibre de débit entre eaux usées et eau préchauffée), ce qui peut sembler faible, mais est à rapprocher du faible coût de ce type d'installation.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Energies renouvelables et Récupération de chaleur fatale			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Solaire thermique	Surdimensionnement des capteurs	Equipements accessibles Calorifuges complets	Autovidangeable si inoccupation l'été.
Photovoltaïque		Onduleur performant	
Bois énergie	Surdimensionnement	Accessibilité du silo Intégrer maintenance et absence d'abonnement à l'étude économique	Chaudière bois à condensation
Ballon thermodynamique	Attention au bruit	Prendre en compte la T° de consigne réelle : impact sur le COP annuel	Mise sur horloge pour profiter de l'air le plus chaud (en journée)

❖ *Pour aller plus loin*

- Energie solaire : <http://www.ines-solaire.org/>
- Photovoltaïque : <http://www.photovoltaïque.info/> ; <http://www.hespul.org/>

2.3.7 Le calcul réglementaire et les labels

Phase	Acteur concerné	Vigilance
BBio au permis de construire Calcul final mis à jour à la réception	BET fluides	Ce n'est pas un calcul prévisionnel ni un outil de conception !

❖ Définition

Avant tout il est important de rappeler le rôle d'un calcul réglementaire : il sert à ce que les pouvoirs publics puissent s'assurer que le bâtiment qui va être construit respecte un certain nombre de règles, notamment un certain niveau de performance énergétique. Le calcul réglementaire est donc absolument nécessaire.

Le niveau de performance énergétique, principal objet du calcul réglementaire, a suivi pour la construction neuve une évolution importante entre la RT 2005 et la RT 2012. On est en effet passés d'une réglementation basée sur un objectif relatif (Cep ref, dépendant de la géométrie du bâtiment) à un objectif absolu (les 50 kW.h/m² du BBC, certes modulés par un grand nombre de paramètres dans la RT2012). Et par la même occasion, le gain en performance a été plus important que l'évolution entre les RT précédentes. Il convient donc de saluer cette **réglementation thermique ambitieuse**, qui fixe un niveau de performance minimal élevé, en cohérence avec les engagements de la France et de l'Europe en matière de lutte contre le dérèglement climatique

Cependant, le calcul réglementaire reste un **calcul conventionnel** et non un calcul prévisionnel, pas plus qu'un outil d'aide à la conception. Il existe pour cela des outils d'ingénieur. Le calcul réglementaire est un outil de validation d'un projet au moment du dépôt du permis de construire (avec l'attestation BBio de la RT 2012) et à la fin du chantier.

La comparaison entre les consommations réelles d'un bâtiment et le calcul réglementaire montre des écarts importants, voire très importants, sur les usages pris en compte. C'est pourquoi **il n'est absolument pas possible de calculer des charges énergétiques prévisionnelles sur la base de ce calcul.**



❖ Enjeux

Les premiers Appels à Projets (2006 et 2007) se sont appuyés sur le calcul réglementaire pour définir les objectifs de performance en neuf (niveau BBC selon RT2005).

- ✖ Cependant, on constate que les besoins de chauffage du calcul réglementaire étaient quasiment toujours très inférieurs à ceux calculés par simulation thermique dynamique. Sachant par des retours de campagnes de mesures que la réalité est plus proche des valeurs de la STD (et souvent encore au-dessus pour diverses raisons, dont l'usage), ce constat a conduit à **s'appuyer davantage sur la STD** sur la fin de l'Appel à Projet 2007 et pour l'Appel à Projets 2008.
- ✖ Par ailleurs, le calcul réglementaire **ne porte que sur 5 usages** (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires), et ne s'intéresse pas aux autres usages d'électricité spécifique ni à la cuisson. Or ces usages deviennent prépondérants dans les bâtiments basse consommation.
- ✖ Enfin, il semblait important de réintroduire des **coefficients d'énergie primaire** plus proches de la réalité que le 2,58 de l'électricité dans le calcul réglementaire, ou que le 0,6 du bois (dans le cadre du calcul BBC seulement, la valeur prise en compte étant 1 dans le calcul RT classique).

Une approche différente était donc nécessaire pour un Appel à Projets visant la performance réelle des bâtiments, et non une performance théorique « sur le papier » dans un contexte global de lutte contre le réchauffement climatique, de fin des fossiles faciles et de précarité énergétique.

C'est pourquoi est née l'idée d'outil de **calcul « physique » des consommations tous usages**, décrit au paragraphe suivant, et sur lequel sont basés les objectifs de performance de l'Appel à Projets 2008.

❖ Points de vigilance

Dans le cadre des Appels à Projets, plusieurs maisons individuelles ont rencontré des **difficultés pour leur labellisation BBC**, alors que sur le fond les projets étaient d'une qualité exemplaire.

Ces difficultés sont les suivantes :

- ✘ Difficulté d'ordre administrative : un dossier de demande de certification BBC doit être déposé avant le chantier : certains Maîtres d'ouvrage s'y sont pris trop tard ;
- ✘ Difficulté pour prendre en compte des solutions innovantes (nécessitant à l'époque un titre V opération) : ballon thermodynamique, poêle bouilleur, puits canadien, etc. ;
- ✘ Situations absurdes, où l'application de la réglementation thermique dégrade la performance énergétique : plusieurs projets chauffés par des poêles à bois se sont vu imposer des radiateurs électriques en appoint car la surface habitable dépassait 110 m² (valeur de l'arrêté de titre V en RT 2005, réduite à 100 m² pour la RT 2012). Pourtant, compte tenu du niveau de performance de ces logements, et de la présence d'une ventilation double flux, ceci n'était pas nécessaire au confort thermique. Les radiateurs ont d'ailleurs bien été installés, mais le disjoncteur a été laissé ouvert... démontrant ainsi l'inutilité de cette disposition coûteuse ;
- ✘ Dans un autre cas, pour valoriser un puits canadien sans avoir à déposer un titre V (RT 2005), il a été tenté de valider le projet à partir du calcul RT 2012, qui intègre cette solution. Mais le garde fou sur la régulation terminale (obligation d'une régulation automatique associée au poêle, exigée par la RT 2012 mais pas par la RT 2005) n'était pas respecté. Faut-il en conclure qu'il est nécessaire de déposer un titre V (procédure lourde, longue et complexe) pour faire valider une solution aujourd'hui courante ? Malgré la livraison de la maison en 2008, le dossier de certification BBC n'est toujours pas clos au moment où nous rédigeons ce rapport...

On conçoit que le propriétaire, qui a consenti beaucoup d'efforts pour disposer d'une maison aujourd'hui réellement très faiblement consommatrice, s'interroge sur le bien-fondé d'une réglementation et d'un label qui lui dénie le droit au Crédit d'Impôts alors même qu'il a atteint des objectifs exceptionnels. Motiver les Français dans un effort collectif urgent et nécessaire devrait conduire à **une plus grande souplesse dans l'application des réglementations et des labels** dès lors que l'objectif visé est réellement atteint et même souvent largement dépassé. Pourquoi ne pas retourner la logique en attribuant le label à ceux qui démontreront *a posteriori* qu'ils ont effectivement atteint des performances excellentes, plutôt que brider les choix possibles parfois en contradiction avec la réalité et les observations de terrain ?

La labellisation BBC de maisons individuelles, confiée à un nombre très restreint de **certificateurs agréés**, s'est avérée un vrai « parcours du combattant » pour plusieurs opérations suivies dans le cadre des Appels à Projet, et ce malgré leur performance exemplaire. On constate une certaine confusion entre les obligations strictement liées au niveau recherché de performance BBC, et l'ajout de contraintes à la légitimité parfois discutable exigées par le cahier des charges propre de certains certificateurs. D'une manière générale, l'ensemble du processus de certification s'est avéré très rigide et peu adapté à des opérations performantes, par essence plutôt innovantes. C'est bien là la grande contradiction de ce label.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Calcul réglementaire			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Calcul réglementaire	Ce n'est pas un calcul prédictif ! Ne pas calculer des charges prévisionnelles sur ce moteur de calcul.	Respecter la réglementation ! Prendre en compte par ailleurs les autres usages de l'énergie.	Anticiper la réglementation 2020 : intégrer l'analyse de cycle de vie, la qualité de l'air,...

❖ *Pour aller plus loin*

- Site de référence, FAQ : <http://www.rt-batiment.fr/>
- Outil de calcul des coefficients Bbiomax et Cepmax de la RT 2012 pour toutes les catégories de bâtiments, développé par Bourgogne Bâtiment Durable en partenariat avec le bureau d'études Tribu Energie, téléchargeable sur <http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/>

2.3.8 Le calcul des consommations tous usages de l'Appel à Projets 2008

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Calcul réalisé dès la phase APS. Calcul détaillé en phase DCE.	BET fluides	Ne se substitue pas au calcul réglementaire, ni aux labels.

❖ Définition

Cet outil a été développé par Enertech pour la région Bourgogne dans le cadre de l'Appel à Projets 2008. Il permet de calculer des consommations d'énergie tous usages confondus, et de valider les critères de performance de cet Appel à Projets (voir § 1.2.1).

Il utilise comme donnée d'entrée le besoin de chauffage calculé par simulation thermique dynamique. Les calculs sont ensuite basés sur les équations de physique du bâtiment, ainsi qu'un grand nombre de valeurs issues de campagnes de mesures, notamment en ce qui concerne les usages privés, mais aussi les hypothèses de puisages ECS.

Le choix a été fait de rapporter les consommations non pas à la surface SHON, mais à la **surface habitable (SHAB)** ou **surface utile brute** dans le tertiaire (SUB), pour se rapprocher au maximum de l'unité fonctionnelle réellement utile à l'utilisateur final.

Les **coefficients d'énergie primaire** sont également différents de ceux du calcul réglementaire :

- L'électricité est prise en compte avec un facteur de 3 (valeur arrondie du coefficient réel qui est de 3,27) ;
- Le bois est pris en compte avec un facteur de 0,2 (valeur arrondie au dixième supérieur des valeurs disponibles au moment de la réalisation de l'outil ²⁸, granulés et plaquettes confondues pour simplifier).

NB : cette valeur basse pour le bois est assortie d'une obligation de performance exprimée en besoin de chaleur, afin d'éviter d'encourager des projets avec une enveloppe moyennement performante « sauvés » par l'énergie bois. En effet, cette énergie ne restera renouvelable que si son utilisation est rationnelle.

- Les réseaux de chaleurs ont été pris en compte au cas par cas, selon la nature du mix énergétique utilisé, avec une hypothèse de rendement de génération et de rendement de distribution.

❖ Fonctionnement de l'outil

L'outil est un tableur de calcul. **Les calculs sont complètement explicites** : c'est tout le contraire d'une « boîte noire » (reproche que l'on peut faire au calcul réglementaire) : on peut facilement retracer chaque étape du calcul, et voir ainsi à quel endroit il est préférable d'agir pour améliorer la performance.

Un onglet permet un calcul simplifié en phase APS/APD, avec un certain nombre de **valeurs par défaut**. En phase DCE, en revanche, il est nécessaire de **dimensionner les principaux auxiliaires** (pompes, CTA,...) et de déterminer leur point de fonctionnement et leur consommation. C'est donc l'occasion de se poser les bonnes questions au moment des dimensionnements, et de voir l'impact des différentes hypothèses : longueur de bouclage, calorifuges, pertes de charges des réseaux de ventilation, etc...

²⁸ Etude Bilan environnemental du chauffage domestique au bois réalisée en 2005 par Bio Intelligence Service pour l'ADEME. Valeur converties de kW.h_{EPNR}/kW.h_{utile} à des kW.h_{EPNR}/kW.h_{final} à partir des rendements (explicités dans l'étude) : Buches 0,08 x 65% = 0,07 x 70% = 0,05 kW.h_{EPNR}/kW.h_{final} ; Plaquettes : 0,05 x 75% = 0,04 kW.h_{EPNR}/kW.h_{final} ; Granulés : 0,18 x 85% = 0,15 kW.h_{EPNR}/kW.h_{final}.

Les consommations d'énergie dans les **parties privatives** sont prises en compte sur la base de valeurs moyennes issues de campagnes de mesures. Il existe évidemment une forte variation d'un logement à l'autre ou d'un bâtiment tertiaire à l'autre en fonction du niveau d'équipement et de la sobriété des occupants. La valeur proposée permet toutefois de mesurer l'importance relative de ces postes de consommation « hors 5 usages réglementaires », et de **quantifier l'impact moyen des mesures possible pour les réduire**. Un tableau de valeurs forfaitaires en fonction des mesures prises a donc été établi.

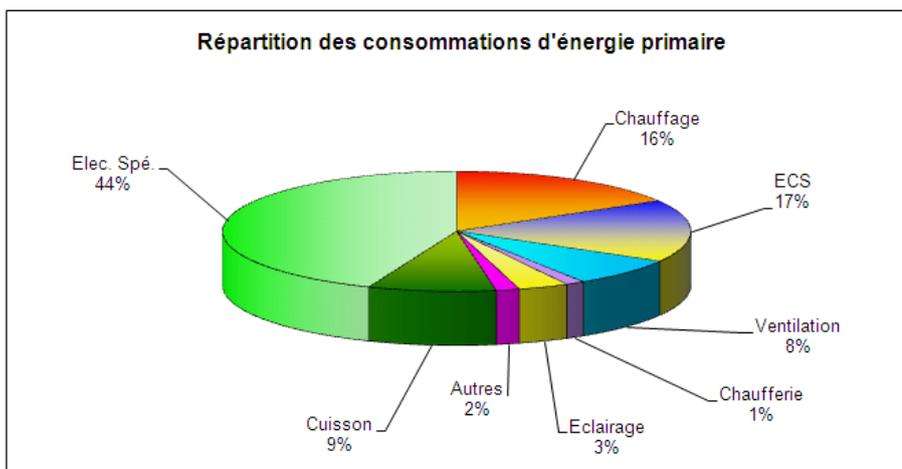
NB : le choix a été fait d'exprimer les consommations privatives des logements en kW.h/m², et non en kW.h par personne, car ce dernier choix aurait privilégié les grands logements par rapport aux petits, ce qui ne semblait pas cohérent dans une logique de réduction de l'impact du bâtiment sur l'environnement.

L'ensemble des formules, hypothèses et données issues de la mesure utilisées dans l'outil est détaillé en annexe 2.

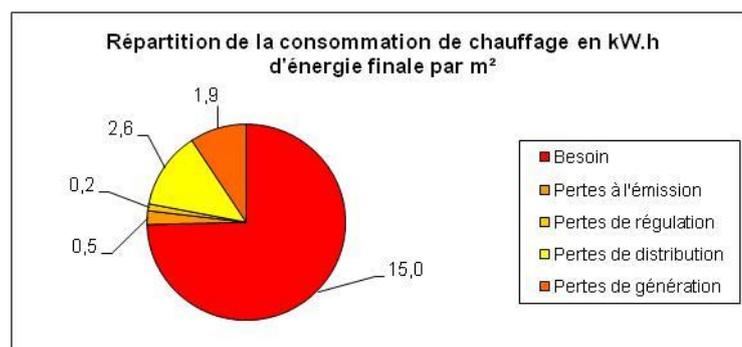
Ce calcul se veut réaliste. Pour autant, comme tous les calculs, la précision du résultat ne fait que refléter la précision des hypothèses... Si l'hypothèse de température de consigne n'est pas juste, la consommation de chauffage ne sera pas atteinte. Si l'hypothèse de taux de fuites du réseau de ventilation n'est pas respectée en phase chantier, la consommation de la CTA va évidemment augmenter.

❖ *Exemple de résultats en logement collectif*

kW.h EP / m ² SHAB	Chauffage	ECS	Services Généraux				Total Commun	Consommations privées		Total Général
			Ventilation	Chaufferie	Eclairage	Autres		Cuisson	Elec. Spé.	
Total	20,1	20,4	9,2	1,6	4,2	2,0	57,6	10,7	53,4	121,7



Exemple de résultat du calcul de consommations tous usages pour un projet de logements collectifs.



Détail de la consommation de chauffage :

La régulation terminale performante permet de réduire les pertes de régulation.

Ici les pertes de distributions sont assez importantes (en jaune) compte tenu de la longueur du réseau.

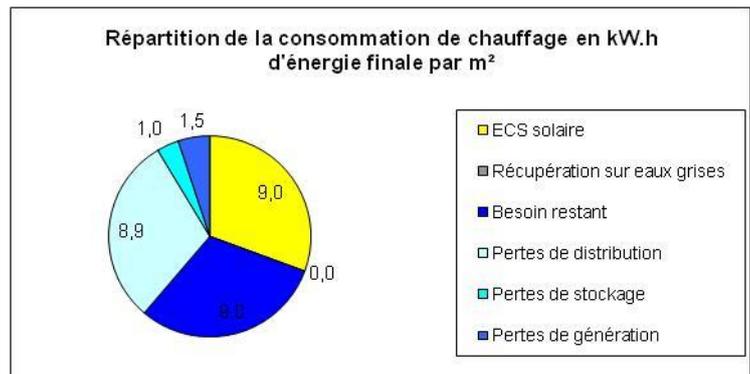
Les pertes de générations sont assez faibles (chaudière à condensation et bas régime d'émission).

Détail de la consommation d'ECS :

L'installation solaire permet de couvrir 50% du besoin en ECS.

Par contre les pertes de distribution (bouclage, en bleu clair), représentent également 50% de l'énergie au puisage, malgré de bons calorifuges.

Le rendement de génération reste bon même en été (préparateur ECS à condensation).



Cuisson		
Energie(s) utilisée(s)	Gaz	
Consommation	Gaz	10,7 kW.hEF/m².an
	Electricité	0 kW.hEF/m².an
Consommation en énergie primaire	10,7 kW.hEP/m².an	

Détail des consommations privées (logement collectif) :

En l'absence de sèche-linge (les habitants disposent d'une possibilité de séchage naturel), et en supposant les logements équipés de réfrigérateurs récents (donc de classe A ou mieux), le principal poste de consommation devient aujourd'hui le poste audio-visuel.

Electricité spécifique		
Froid	Pré-équipé Classe A	3,2 kW.hEF/m².an
Audio visuel	Prise commandée - collectif	5,1 kW.hEF/m².an
Informatique	Base	3,1 kW.hEF/m².an
Eclairage	Pré-équipé en LBC	2 kW.hEF/m².an
Lave vaisselle	Alim EF-EC - collectif	1,8 kW.hEF/m².an
Lave linge	Séchage naturel	2,6 kW.hEF/m².an
Consommation d'électricité spécifique	17,8 kW.hEF/m².an	
Consommation en énergie primaire	53,4 kW.hEP/m².an	

❖ Exemple de résultats pour un bâtiment de bureaux

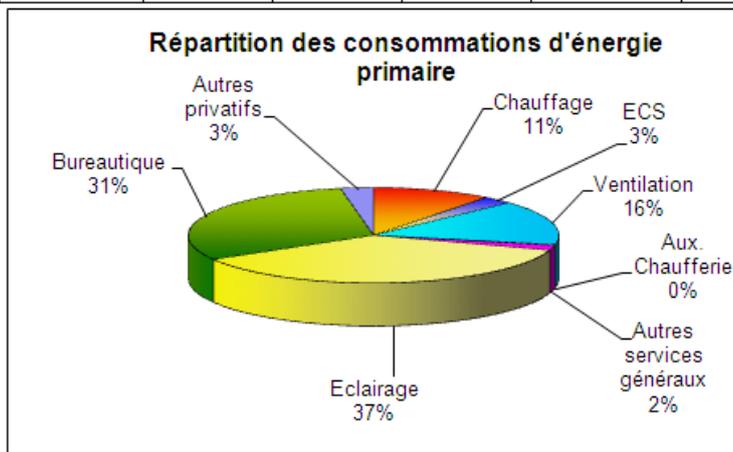
Bilan des consommations en kW.h/m² SU.an d'énergie primaire

Bâtiment tertiaire

Rappel : coefficient d'énergie primaire de l'électricité :

3

Bâtiment	Chauffage	ECS	Services Généraux			Eclairage	Bureautique	Autres privés	Total Général
			Ventilation	Chaufferie	Autres				
Total kWh/m²	5,3	1,3	7,7	0,2	0,8	18,5	15,6	1,5	50,9



Respect des objectifs de l'appel à projet

Niveau 1	Chauffage	Besoin Ch.	Tous usages
Objectif	30	30	125
Calcul	5,3	17,5	50,9

Niveau 2	Chauffage	Besoin Ch.	Tous usages
Objectif	20	25	80
Calcul	5,3	17,5	50,9

Niveau 3	Ch + ECS	Besoin Ch.	Couverture EnR
Objectif	22	20	56,0
Calcul	6,6	17,5	60,0

Exemple de résultat du calcul de consommations tous usages pour un projet de bureaux à énergie positive.

On note la part prépondérante que prennent l'éclairage et la bureautique par rapport au chauffage (ici au bois). Ici 85% des consommations d'énergie primaire sont de l'électricité spécifique.

Eclairage (hors parties privatives des logements)

Bâtiment tertiaire

	Eclairage Lux	Surface m ²	Puissance installée (W)	Ratio (W/m ²)	Utilisation (h/an)	Conso kW.h/an
Bureau paysager	200 + 200	137	685	5,0	1 750	1 199
Bureau collectif	200 + 200	1 020	5 100	5,0	1 250	6 375
Bureau individuel	200 + 200	820	4 100	5,0	840	3 444
Couloirs	100	745	4 470	6,0	1 050	4 694
Sanitaires	20	66	461	7,0	700	322
Escaliers	150	221	1 326	6,0	1 250	1 658
Archives	150	411	784	1,9	260	204
Parking sous terrain	20 / 50	555	686	1,3	824	565
Total		3 975	17 612			18 460

Commentaires :

Les bureaux ont été pris avec un éclairage crépusculaire et détection de présence (coefficient correcteur de 70% sur la base manuelle). L'éclairage des locaux techniques (chaufferie et CTA) a été négligé.

Eclairage de sécurité

	Type	Nombre	Puissance	Consommation
BAES / BAEH	Performant	20	0,7 W	123 kW.h/an

Total des consommations d'éclairage

Consommation en énergie finale	18 583 kW.h EF /an
Consommation en énergie primaire	55 749 kW.h EP /an
	18,5 kW.hEP/m ² .an

Détail du calcul des consommations d'éclairage

Bureautique (tertiaire uniquement)

	Nombre	Puissance fonct. (W)	Puissance veille/arrêt (W)	Utilisation (h/an)	Veille/arrêt (h/an)	Consommation
Ecran	18	34	2,5	1850	1705	1208,93 kW.h/an
Unité centrale	18	47	2,8	1850	1705	1651,03 kW.h/an
Ordinateur portable	95	25	0,8	1850	1705	4523,33 kW.h/an
Serveur	3	115		8760		3022,20 kW.h/an
Terminal (serveur déporté)	17	15	0,6	1850	1705	489,14 kW.h/an
Onduleur						0 kW.h/an
Total						10894,628 kW h/an

Appareils divers	Nombre	Veille	Consommation unitaire	Consommation totale
Imprimantes jet d'encre	4	Sur horloge	17 kW.h/an	68 kW.h/an
Imprimantes laser	8	Sur horloge	141 kW.h/an	1128 kW.h/an
Photocopieur multifonction	7	Sur horloge	418 kW.h/an	2926 kW.h/an
Fax	6	Sur horloge	70 kW.h/an	420 kW.h/an
Onduleurs (ensemble pour le plateau)	1	En veille	172 kW.h/an	172 kW.h/an
		En veille	kW.h/an	0 kW.h/an
		En veille	kW.h/an	0 kW.h/an
		En veille	kW.h/an	0 kW.h/an
		En veille	kW.h/an	0 kW.h/an
		En veille	kW.h/an	0 kW.h/an
Total				4714 kW h/an

Total des consommations de bureautique

Consommation en énergie finale	15 609 kW.h EF /an
Consommation en énergie primaire	46 826 kW.h EP /an
	15,6 kW.hEP/m ² .an

Commentaires

130 ordinateurs au total pour 120 personnes

Détail du calcul des consommations de bureautique

Ces captures d'écran permettent de voir le niveau de détail auquel les équipes ont travaillé. Les puissances installées pour l'éclairage sont justifiées par le dimensionnement des luminaires, avec calcul Dialux sur une sélection de locaux représentatifs.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Calcul de consommations tous usages			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Calcul de consommations tous usages	Ne pas limiter la réflexion aux 5 usages réglementaires	Baser le calcul de la consommation de chauffage sur la STD Discuter des données d'entrées avec le Maître d'ouvrage (consigne...)	Assurer la transparence des calculs (pas de boîte noire) Faciliter l'optimisation énergétique : présentation graphique des résultats...

❖ Pour aller plus loin

- *Détail méthodologique de l'outil de calcul des consommations tous usages de l'Appel à Projets 2008 : annexe 2 du présent rapport.*
- *Cahier des charges de simulation thermique dynamique : annexe 1 du présent rapport.*

2.3.9 Les particularités de la Rénovation

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Importance du relevé dès la phase Diagnostic	Toute l'équipe	Niveau de performance à viser Prise en compte du site occupé

❖ Contexte réglementaire

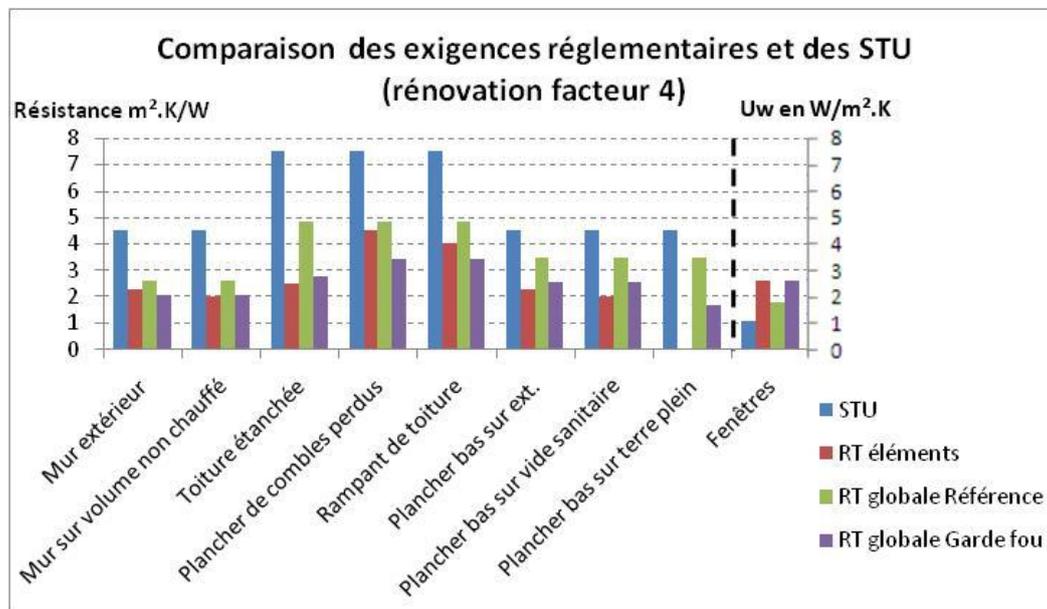
Comme cela a été dit, la RT 2012 a permis de relever le niveau de performance minimal pour les projets neufs à un niveau assez ambitieux. Ceci permet de lancer une dynamique de performance dans le secteur du bâtiment, ce qui ne peut être que positif. Cependant, l'impact de la construction neuve sur la performance du parc global de bâtiments est très lent. En effet **on ne construit que l'équivalent en surface de 3% du parc par an, dont la moitié environ constitue une augmentation du parc**. Si on ne comptait que sur la construction neuve, il faudrait donc plus de 60 ans pour arriver à un parc performant. **Or il y a urgence ! Les engagements du facteur 4 sont à horizon 2050**. C'est donc sur la rénovation des bâtiments anciens, qui concentrent aujourd'hui l'essentiel des consommations énergétiques du bâtiment, qu'il faut agir.

Or la réglementation thermique en rénovation demeure actuellement sans grande ambition énergétique. A ce jour sont applicables :

- Soit la **RT 2005 rénovation « éléments par éléments »** : cette réglementation s'applique aux bâtiments d'avant 1948, ou de moins de 1000 m², ou encore si le budget des travaux est inférieur à 25% de la valeur conventionnelle du bâtiment. Elle fixe des performances minimales pour les éléments rénovés, mais sans imposer de bouquet de travaux. Par exemple si on veut changer les menuiseries, on doit atteindre une certaine performance. Mais rien n'oblige à les changer.
- Soit la **RT 2005 rénovation « globale »** : celle-ci s'applique aux bâtiments d'après 1948, de plus de 1000 m², et pour lesquels le budget de travaux est supérieur à 25% de sa valeur conventionnelle.

Cette réglementation fixe un objectif global à atteindre (consommation énergétique sur 5 usages calculée par méthode Th-CE-Ex inférieur à une valeur Cep max), assorti de garde-fous (performances minimales élément par élément).

Le graphique suivant permet de comparer les niveaux de performances demandés sur l'enveloppe dans la réglementation thermique sur la rénovation, en comparaison avec les performances exigées dans le cadre des Appels à Projets (issues des solutions techniques universelles, ou STU, établies par Enertech) :

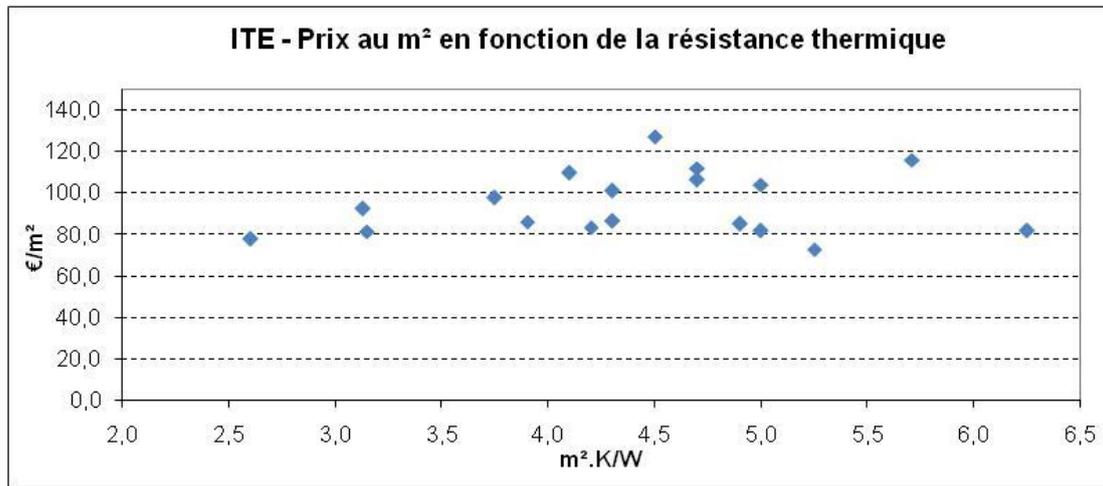


Comparaison des exigences réglementaires (RT par éléments, référence de la RT globale et garde fou de la RT globale) avec les exigences des Appels à Projets (STU), exprimées en résistance thermique pour les parois opaques et en Uw pour les menuiseries.

On voit que **les performances imposées par la réglementation sont environ deux fois inférieures à celles exigées par les Appels à Projets**. Or on rappelle que ces dernières ont été calculées pour permettre une division par quatre des consommations de chauffage, soit d'arriver à 50 kW.h/m² en moyenne sur le parc national. En effet, pour respecter nos engagements climatiques et faire face à la fin des « fossiles faciles », nous devons viser l'objectif d'un parc quatre fois moins consommateur en 2050 qu'aujourd'hui, donc une consommation moyenne du parc ancien de 50 kW.h par m² de surface utile et par an en énergie primaire pour le chauffage, en résidentiel comme en tertiaire.

On constate donc que la réglementation n'est pas cohérente avec les objectifs du facteur 4. Pire, elle incite à réaliser des rénovations de performance moindre. Or personne ne rajoutera demain l'épaisseur d'isolant manquante : le temps de retour sur investissement serait très mauvais, et par ailleurs on n'aurait pas assez de main d'œuvre pour faire le travail deux fois. **En un mot, ces rénovations réglementaires auront « tué le gisement » d'économies d'énergie** : les derniers kW.h/m² ne seront jamais économisés.

Et cela pour une mauvaise raison : le législateur a dû penser que le coût de la rénovation était proportionnel à sa performance. **Or on sait aujourd'hui que le coût marginal du centimètre supplémentaire est en réalité négligeable**, comme le montre le graphique suivant :



Prix au m² de l'isolation par l'extérieur en polystyrène sous enduit en fonction de la résistance thermique. On voit que l'augmentation de l'épaisseur ne joue que sur 20% du prix environ. L'importante dispersion des prix montre que l'impact des sujétions (retours sur menuiseries, intégration de descentes de chéneaux, etc) est plus important que celui de la performance elle-même.

Par ailleurs, les garde fous ou valeurs de référence de la réglementation thermique en rénovation sont bien souvent inférieures aux valeurs minimales nécessaires pour obtenir des financements (prêt à taux zéro, subventions ANAH, etc.).

C'est pourquoi il semble urgent de renforcer le niveau d'exigence de la réglementation thermique sur la rénovation.

❖ Bonnes pratiques

L'importance du relevé en phase diagnostic

La phase de diagnostic de l'existant est essentielle en rénovation, notamment le **relevé des installations techniques**. En effet il est essentiel de connaître en détail le tracé et les diamètres des réseaux existants (pour dimensionner les calorifuges, calculer les équilibrages...), mesurer la place disponible pour les calorifuges, relever les conduits pouvant (ou non) être réutilisés pour la ventilation, relever la taille des émetteurs existants s'ils sont en bon état (pour recalculer la loi d'eau), etc.

Le **repérage de l'amiante ou du plomb**, mais aussi d'éventuels défauts de la structure permettra également de discuter très en amont de la stratégie à adopter sur ces sujets qui ont un fort impact sur la conception et le budget de l'opération.

Comme on le verra par la suite, **la rénovation recèle toujours des surprises, qu'il vaut mieux intégrer à la conception que découvrir sur le chantier...** C'est pourquoi c'est au final un gain de temps et d'argent pour le Maître d'ouvrage que de se donner les moyens (temps et honoraires) au début des études pour un relevé détaillé.

La prise en compte du site occupé

Lorsque la rénovation doit se dérouler en site occupé, la conception doit impérativement prendre en compte ce paramètre humain.

La phase de travaux est perturbante pour les habitants : il y a du bruit, une installation de chantier qui prend de la place, des ouvriers partout... Cela peut être mal vécu, notamment par des personnes âgées.



La conception doit donc intégrer une information et des échanges avec les habitants : pas trop tôt pour ne pas susciter une attente qui ne se concrétisera que longtemps après, mais suffisamment en amont pour que les travaux soient bien compris.

En phase de conception, on recherchera à **minimiser les temps d'intervention à l'intérieur des logements**, et de façon générale à minimiser les nuisances (notamment le bruit). Les solutions comme la préfabrication, les assemblages de réseau sertis et non soudés, etc., sont à privilégier.

En phase chantier, la réalisation d'un **logement témoin** s'avère très importante pour susciter l'adhésion des occupants aux travaux de rénovation. Le fait de voir un logement fini permet de rendre plus concrète la rénovation et les améliorations qu'elle apportera.

La prise en compte des habitants implique aussi de **ne pas leur mentir sur les performances visées**. Un locataire en situation de précarité énergétique, ou un propriétaire investissant dans son logement, seront en attente d'économies réelles suite à une rénovation énergétique. **On ne peut donc pas se contenter de calculs que l'on sait distants de la réalité** (calcul réglementaire, ou pire DPE). Il faut au contraire s'appuyer sur des outils tels que la STD, avec une approche réaliste et concertée sur l'usage réel du bâtiment, température de consigne et ouverture des fenêtres notamment.

Zoom sur la ventilation

La ventilation double flux en rénovation est possible, et les Appels à Projets ont montré de belles réalisations en la matière :

- ✓ En maison individuelle (surtout lorsqu'on dispose de combles perdus),
- ✓ Mais aussi en logement collectif et en tertiaire. La création d'un réseau nécessite de disposer de place pour la création d'une gaine (ancien cellier, etc).



Carottage de dalle en rénovation en site occupé, dans le cellier.



Réseau de ventilation et de chauffage créé dans un cellier.



Faux plafond (démontable) et bouche de soufflage mis en œuvre en rénovation.

D'autres formes de ventilation double flux sont également possibles :

- ✓ Les réseaux collectifs peuvent passer par l'extérieur, et être intégrés dans l'épaisseur de l'ITE.
- ✓ Il existe également des caissons de ventilation double flux décentralisée, permettant d'éviter les réseaux (sauf le gainage par exemple de la reprise d'une pièce humide attenante). Plusieurs modèles à échangeur statique performant et présentant des débits équilibrés sont aujourd'hui disponibles en France. A titre d'illustration (non exhaustif) on peut citer pour le logement : Zehnder Confoair 70, Helios Ecovent KWL EC, Brink Air 70, Meltem WRG, Paul Ventos 50, etc. ; et pour les classes Helios gamme Airmaster, Atlantic Nova HR, etc.



Réseau réalisé par l'extérieur, dans l'épaisseur de l'ITE (hors AAP)



Ventilation double flux décentralisée (hors AAP) : prise d'air et rejet se font à travers le mur. Photo des carottages et de la platine, puis pose du caisson.



D'autres pistes sont également envisageables pour assurer la qualité de l'air et la performance :

- ✓ La ventilation simple flux autoréglable associée à une pompe à chaleur sur l'air extrait, pour assurer la production d'ECS et même idéalement le chauffage.
- ✓ Les menuiseries pariéto-dynamiques.

Ces pistes n'ont malheureusement pas été explorées dans le cadre des Appels à Projets.

Réemploi des émetteurs et régulation terminale

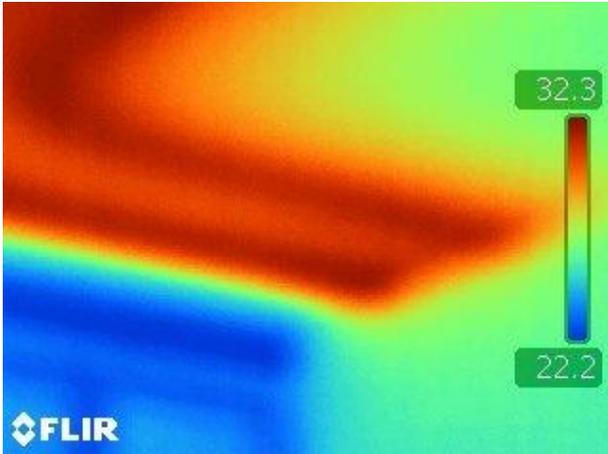
Dès que cela est possible, il est intéressant du point de vue économique de **réutiliser les émetteurs existants**.

Il est en revanche impératif de prévoir une **régulation terminale performante**. En effet, après rénovation, la contribution des apports gratuits au chauffage va être bien plus importante qu'avant rénovation : il est crucial pour que les économies d'énergie et de charges soient réelles que ces apports gratuits soient effectivement valorisés. Et cela n'est possible qu'avec une régulation terminale ad minima logement par logement, avec une réponse précise et rapide.

Le cas des bâtiments chauffés par dalle active est à ce titre compliqué : souvent les nappes courent d'un logement à l'autre, et chauffent tout autant vers le haut que vers le bas. La répartition des puissances entre logements est par ailleurs radicalement différente après rénovation, or on ne dispose souvent d'aucun organe d'équilibrage **Il est donc irréaliste d'équilibrer et de réguler correctement ce type d'émetteur en rénovation**, avec une simple loi d'eau pour un bâtiment entier...

Une solution très intéressante et relativement peu coûteuse a été apportée à ce problème sur une opération des Appels à Projets a été :

- Réutilisation en base de la dalle active, avec un régime de température suffisamment bas pour n'assurer qu'une température de 17°C environ ;
- Appoint de chaleur par une **batterie hydraulique unique par logement, sur le soufflage de la ventilation double flux**. La régulation de cette batterie est assurée par un thermostat situé dans le séjour (coût d'environ 900 € par logement, pour le réseau, la batterie et le thermostat)



Thermographie infrarouge d'une dalle active : la boucle passe d'un logement à l'autre ! (hors AAP)



Chauffage complémentaire à la dalle active réutilisée, par batterie hydraulique sur le soufflage de la ventilation double flux.

❖ Points de vigilance :

Les photos ci-dessous illustrent le type de surprises que l'on peut rencontrer en rénovation :



Ci-contre : Pieds de conduit shunt non rebouchés (depuis la construction !). Tout le tirage thermique permettait de ventiler... une cave, et non les logement ! (hors AAP)

Nid d'oiseau tombé dans un conduit (hors AAP).

Prévoir le curage des conduits réutilisés (avec vérification par passage caméra).

Vérifier également l'état des conduits (absence de fissures, d'éclats), et la présence des raccords terminaux.



Conduit de dalle active sectionnée lors d'un carottage de dalle.

Solution : repérer les réseaux en phase de conception avec une caméra thermique.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Particularités de la Rénovation			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Rénovation	« Tuer le gisement » d'économies par des performances trop faibles.	Réaliser un relevé exhaustif du bâtiment dès le début des études de Maîtrise d'œuvre, pour éviter les surprises sur le chantier. Prévoir l'équilibrage et la régulation terminale du chauffage après isolation.	Viser la rénovation facteur 4, par exemple avec les Solutions Techniques de Référence. Réaliser une rénovation globale : coût et nuisances réduites par rapport à une rénovation par étape.

❖ *Pour aller plus loin*

- *Enjeux de la rénovation, Solutions Techniques de Référence : documents disponibles sur le site www.enertech.fr*
- *Note technique « Principes et matériels de ventilation double flux décentralisée avec récupération de chaleur », disponible sur www.enertech.fr.*

2.4 Qualité environnementale

2.4.1 Eléments de Qualité environnementale

Phase	Acteur concerné	Vigilance
APS à DCE	Architecte, économiste, BE QEB	Compatibilité avec les règles d'urbanisme pour la végétalisation, Avis techniques pour les matériaux bio-sourcés, etc.

❖ Enjeux et contexte réglementaire

Les enjeux du bâtiment vont évidemment bien au-delà de l'énergie, même si celle-ci reste aujourd'hui le principal impact du secteur. C'est pourquoi les Appels à Projets ont été conçus avec une vision plus globale, et des critères de qualité environnementale ont été intégrés aux exigences.

Le législateur n'ignore pas ces enjeux : **il est déjà prévu que la future réglementation 2020 ne soit pas seulement thermique**, mais englobe également le lien entre le bâtiment et le territoire, le cycle de vie et l'empreinte carbone, la biodiversité, ou encore la santé et le confort.

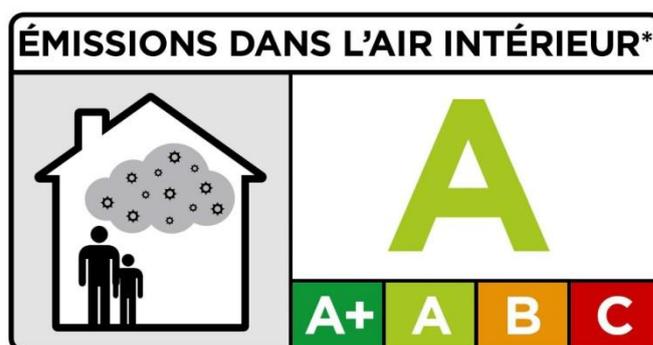
On note également la loi du 2 décembre 2011 qui a instauré une obligation de surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les ERP, en commençant par ceux qui accueillent les enfants les plus jeunes (crèches, écoles maternelles). Les mesures effectuées ont apporté des retours d'expérience très intéressants. Malheureusement cette dynamique est brisée par l'annonce récente que l'obligation allait être repoussée et remplacée par un guide de bonnes pratiques²⁹.

En termes de matériaux, on peut déplorer de même l'abrogation de l'obligation d'utilisation du bois dans la construction neuve³⁰. Suite à un recours du Syndicat français de l'industrie cimentière (SFIC) et de la Fédération de l'industrie du béton (FIB), le conseil constitutionnel a invalidé cette disposition.

En revanche, depuis le 1^{er} janvier 2012, les produits de construction et de décoration sont munis d'une **étiquette « Emissions dans l'air intérieur »**, allant de A+ (faibles émissions) à C (fortes émissions). L'évaluation porte à la fois sur l'émission de formaldéhyde et de COV (composés organiques volatils), et sur d'autres polluants présents dans les logements.

Les matériaux concernés sont les cloisons, revêtements de sols, isolants, peintures, vernis, colles, adhésifs, etc. dans la mesure où ceux-ci sont destinés à un usage intérieur.

Au 1^{er} janvier 2012 seuls les nouveaux produits commercialisés en France devaient posséder une étiquette. L'obligation a été étendue à tous les produits visés vendus en France depuis le 1^{er} septembre 2013.



Exemple d'étiquette « Emissions dans l'air intérieur »

²⁹ Communiqué de presse de Mme Ségolène Royal, Ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, le 24 septembre 2014.

³⁰ Décret n° 2010-273 du 10 mars 2010 : Entre décembre 2010 et novembre 2011, la quantité ne pouvait être inférieure à 20 dm³ par m² pour les immeubles d'habitation, à 3 dm³/m² pour les constructions industrielles et à 7 dm³/m² pour les autres bâtiments. Après le mois de décembre 2011, ces valeurs sont respectivement passées à 35 dm³/m², 5 dm³/m² et 10 dm³/m².

❖ Objectifs de l'appel à projet

Comme présenté rapidement au § 1.2.1, les Appels à projets comportaient les exigences suivantes :

- ✖ Interdiction de l'usage de bois tropicaux,
- ✖ Réduction de l'usage du PVC : en particulier au niveau des sols et des menuiseries.

Par ailleurs, des subventions complémentaires encourageaient les bonnes pratiques suivantes :

- ✓ Utilisation de matériaux bio-sourcés,
- ✓ Récupération des eaux pluviales,
- ✓ Végétalisation des toitures.

Par ailleurs, de nombreux projets ont été réalisés en construction à ossature bois (généralement à l'initiative des Maîtres d'ouvrage).

La question de la réduction de la pollution de l'air intérieur a été abordée dans le cadre des Appels à Projets, en encourageant les bonnes pratiques suivantes (lors de la relecture des DCE) :

- ✓ Utilisation de peintures labellisées et à faible contenu en COV (composés organiques volatils, par exemple moins de 1 g/l de COV) ;
- ✓ Préconisation de panneaux de particules à faibles contenu en Formaldéhydes (classement E0,5).

NB : les normes et labels ayant fortement évolué depuis la formulation de ces objectifs, on pourra dorénavant :

- ✓ *s'appuyer sur l'étiquette désormais obligatoire, et imposer un classement A+ de l'ensemble des matériaux d'aménagement intérieur ;*
- ✓ *Il reste pertinent d'exiger des labels pour les peintures (Ange bleu, etc.), mais aussi pour les moquettes et sols souples ;*
- ✓ *Les panneaux de particule, mais aussi les faux plafonds, ont été identifiés comme gros émetteurs potentiels de formaldéhyde, c'est pourquoi il est pertinent d'exiger un classement Emission E1 voire E0,5 pour ces matériaux ;*
- ✓ *Pour les colles, on pourra exiger le classement GEM EC1 qui garantit leurs très faibles émissions de polluants.*



Logo de l'écolabel allemand Ange bleu

❖ *Bonnes pratiques*

Les photos suivantes présentent de belles réalisations suivies dans le cadre des Appels à Projets :

Isolation bio-sourcée



Maison à ossature bois : isolation entre ossature réalisée en ouate de cellulose.



Complément d'isolation par l'extérieur en laine de bois.



Isolation du sous-bassement en liège



Isolant liège expansé en vrac pour remplissage d'une ossature bois.



Bâtiment tertiaire isolé avec des bottes de paille. Enduit extérieur en cours.



Autre bâtiment de bureau isolé en paille.

Bardages bois



Bardage en bois laissé brut.



Bardage en bois huilé.



Bardage bois pré-grisé

Menuiseries et occultations



Menuiserie bois



Menuiserie bois-alu



Volet coulissant bois persienné

Toitures



Isolation de toiture en laine de roche sous étanchéité (réduction des impacts par rapport à du polyuréthane)



Toiture végétalisée.

Aménagements intérieurs



Sol carrelé et plancher bois.



Sol souple en (vrai) linoléum et non sol PVC



Cloison en brique de terre crue.



Dormant de porte coupe-feu en chêne et non en bois exotique

❖ Points de vigilance

Contexte réglementaire et administratif

- ✖ **Certaines contraintes réglementaires freinent aujourd'hui la mise en œuvre d'isolants biosourcés** : par exemple il est actuellement compliqué de mettre en œuvre une ITE en laine de bois sur un ERP ou un bâtiment de logements collectifs : les produits ne disposent pas encore de DTA (document technique d'application). Selon le positionnement du bureau de contrôle, un ATEX (avis technique expérimental pour l'opération) peut être nécessaire.
- ✖ La problématique est également sensible concernant **la construction en paille**. La logique recherchée pour ce type de matériaux est d'utiliser des ressources locales. Il a donc été envisagé sur un projet d'utiliser de la paille récoltée sur la commune. Cela n'a pas été possible, car le code des marchés publics ne permettait pas d'insérer une telle clause, ni la mise en œuvre par l'entreprise d'une paille mise à disposition par la commune. La consultation s'est donc faite avec la mise en œuvre et la fourniture de la paille à la charge de l'entreprise.
- ✖ Les aller et retours sur **la question du traitement ignifuge de la ouate de cellulose** ont également semé le doute dans la filière : la commission chargée de formuler les avis techniques a annoncé pendant l'été 2011 que les avis technique des ouates traitées au sel de bore seraient invalidés, avec un répit accordé jusqu'à juin 2012, au profit des ouates traitées au nitrate d'ammonium. Suite à des problèmes avec ce dernier traitement (dégagement d'ammoniac dans certaines conditions), les avis techniques avec sel de bore ont finalement été rétablis en novembre 2012, dans l'attente d'une formulation « qui s'affranchisse autant des sels de bore que des risques de dégagement d'ammoniac ».



Ouate de cellulose insufflée en combles

Utilisation du bois

- ✖ Les bois mis en œuvre sur les projets **n'étaient pas toujours du bois local**. Ainsi des bois de bardage (mélèze notamment) sont venus de l'étranger, alors que la région Bourgogne dispose d'une ressource importante en bois d'œuvre...
- ✖ Attention également au bilan environnemental du **bois traité par autoclave** : ce traitement est coûteux en énergie et utilise des produits nocifs (cuivre, chrome et arsenic pour le traitement classique).
- ✓ Préférer des **bois naturellement de classe 3 pour les bardages** : douglas (purgé d'aubier), mélèze (attention à la provenance...),...
- ✓ Pour les bois horizontaux en extérieur, il existe aussi des bois locaux naturellement de **classe 4** : robinier (faux acacia), Chêne rouvre et pédonculé, Châtaignier,...
- ✓ Si un traitement reste souhaité (pour raison économique...), préférer un traitement oléo-thermique ou par réтификаtion, qui ont un moindre impact environnemental que le traitement autoclave. Il existe aussi des traitements autoclave au cuivre et au bore.

Les matériaux de synthèse à supprimer en priorité

- ✖ **La production du PVC** nécessite du chlore, dont la production est particulièrement polluante. Malgré l'intérêt économique des sols et menuiseries en PVC, ainsi que leur facilité d'entretien, ces matériaux ont un très fort impact environnemental.
- ✖ **Le polyuréthane** est l'isolant ayant le plus fort contenu énergétique (énergie grise). De plus, il est particulièrement dangereux en cas de combustion, car il dégage alors du cyanure. C'est pourquoi cet isolant semble à proscrire pour un usage intérieur. Son remplacement en toiture terrasse par de la laine de roche prévue pour la pose sous étanchéité semble également une amélioration prioritaire.
- ✖ **Les polystyrènes extrudés aux HFC** ont un impact climatique catastrophique, du fait du pouvoir de réchauffement climatique (GWP) très important des HFC utilisés. Les économies d'énergie qu'ils apportent ne suffisent pas à compenser les émissions dues à leur production. Préférer systématiquement les polystyrènes expansés. Si ce n'est pas possible pour l'utilisation voulue, préférer les polystyrènes extrudés au CO₂ (cela existe, y compris pour l'isolation sous dalle flottante - voir chez Styrodur, Jackon, Ursa,...).

❖ Si c'était à refaire ?

Avec le recul, si un nouvel appel à projet devait être lancé, il n'y aurait pas de subvention sur la végétalisation des toitures. En effet les bénéfices attendus sont limités, et des inconvénients ont été constatés.

Gains attendus :

- ✖ La contribution de la végétalisation au confort d'été n'est pas évidente. En effet, l'inertie de la végétalisation est séparée de l'air intérieur par une isolation très importante : elle est donc en pratique inefficace, ou en tout cas non prépondérante par rapport à la présence d'une dalle sous l'isolant ;
- ✓ L'apport de biodiversité en zone urbaine est un intérêt réel. Il convient cependant de distinguer végétalisation intensive, dont l'intérêt est limité, et végétalisation extensive qui apporte une vraie vie sur la toiture. On peut noter également que d'autres solutions existent (travail sur les essences plantées en pleine terre, hôtels à insectes en mur ou en toiture, etc.) ;



Hôtel à insectes en façade

- ✓ La rétention d'eau pluviale est également un point positif. Cependant, pour qu'elle soit effective, les exigences doivent être précisées : une végétalisation intensive par pose de bac plastique contenant un substrat ne permet pas un stockage d'eau pluviale efficace. Il aurait fallu concentrer la subvention sur la végétalisation extensive.

Inconvénients constatés :

- ✗ Utilisation quasi systématique du polyuréthane et de goudron pour l'étanchéité, produits à fort impact environnemental et dont les émanations sont dangereuses pour la santé ;
- ✗ Disparition des spécificités architecturales locales : généralisation de la toiture plate au détriment des toitures traditionnelles.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Eléments de qualité environnementale			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Isolants	Polystyrène extrudé aux HFC Polyuréthane (surtout en intérieur)		Isolants bio-sourcés, Murs à ossature bois.
Bardage	Bois traité autoclave	Traitement oléo-thermique ou réтификаtion	Bois naturellement de classe 3, voire 4
Matériaux d'intérieur	Sols PVC, Bois exotiques.	Classement A des matériaux d'intérieur. Peinture éco-labellisées.	Classement A+ des matériaux d'intérieur : peintures, sols, panneaux de particules, faux plafond, ...).
Autres		Récupération d'eau pluviale en maison individuelle.	

❖ *Pour aller plus loin*

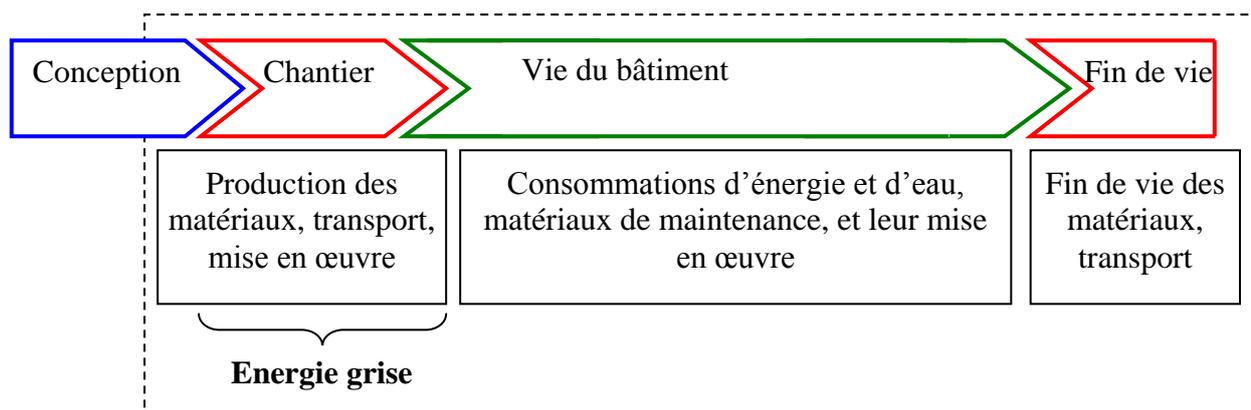
- *Matériaux biosourcés : L'isolation écologique, de Jean Pierre Oliva, publié chez Terre vivante.*
- *Construction paille :*
 - *Règles professionnelles de construction en paille, ouvrage réalisé par le réseau français de construction en paille (<http://www.compaillons.eu/rfcp>), publié aux éditions du Moniteur.*
 - *La construction en paille, de Luc Floissac, publié chez Terre vivante.*

2.4.2 Première approche de l'énergie grise / ACV du bâtiment

Phase	Acteur concerné	Vigilance
APS à DCE	BE QEB, BE, ou Architecte	Outil d'aide à la décision à utiliser suffisamment en amont pour pouvoir orienter effectivement le projet.

❖ Définition

L'**énergie grise** est l'énergie utilisée pour la fabrication des matériaux constituant un bâtiment. Une analyse complète nécessite de prendre en compte également l'énergie utilisée pour le transport et la mise en œuvre des matériaux. On peut s'intéresser à l'énergie primaire totale, ou à l'énergie primaire non renouvelable.



Analyse de cycle de vie

L'**analyse de cycle de vie**, ou ACV, est une approche plus complète, et multicritère. Le périmètre considéré va de la fabrication des matériaux à la fin de vie du bâtiment, en passant par la consommation d'énergie et les impacts des matériaux de maintenance pendant la phase d'utilisation, jusqu'au traitement des déchets de démolition. On parle aussi d'analyse « du berceau à la tombe » (en anglais « cradle to grave »).

Les indicateurs étudiés ne se limitent pas à l'énergie, mais englobent un grand nombre d'impacts, comme le réchauffement climatique, les déchets nucléaire, la consommation d'eau, l'eutrophisation des milieux humides, l'épuisement des ressources, etc.

❖ Objectifs de l'appel à projet

Dans l'Appel à projet 2008, les équipes étaient invitées à travailler sur le contenu Energie Grise des bâtiments. Certaines équipes ont ainsi réalisé une analyse de cycle de vie de leur bâtiment.

En parallèle, **une base de données d'ACV du bâtiment a été développée par Cycleco** avec Enertech et Tekhné pour la Région Bourgogne et l'ADEME. Cette base de données a été développée à partir de la base ecovinent, dont les impacts ont été recalculés dans le contexte énergétique et industriel français. Le choix de cette source a été fait après une étude d'état de l'art sur les bases de données existantes :

Extrait d'un rapport de Cycleco réalisé dans le cadre de leur mission :

« En effet, elle [ecovinent] est considérée comme une référence mondiale pour la cohérence et la transparence en ce qui concerne la réalisation d'inventaires lors d'une ACV. Elle combine différentes bases de données d'inventaire existantes et les enrichit afin d'obtenir un ensemble unifié et générique de données d'inventaire valables spécifiquement pour les Pays d'Europe Occidentale. Environ 700 facteurs d'émission et d'extraction sont donnés pour plus de 4300 processus couvrant entre autres matériaux, processus industriels, mais aussi l'approvisionnement en énergie, les

services de traitement des déchets et les transports. Le niveau d'agrégation des processus n'est pas toujours identique : on trouve des processus élémentaires, tels que le mix énergétique ou la consommation d'eau, comme des produits plus complexes construits à partir des processus élémentaires. Face à la richesse et transparence de la base ecoinvent, Cycleco et la Région Bourgogne ont choisi de développer la base de l'outil à partir des données d'ecoinvent principalement, évitant ainsi la problématique du mélange des bases de données. »

Cette base de donnée a permis la réalisation d'un outil d'ACV du bâtiment : e-LICCO.



Les équipes intéressées ont ainsi pu réaliser l'ACV de leur projet en tant que testeurs de l'outil e-LICCO v1, ce qui a permis d'avoir des retours sur le logiciel et la base de données, ainsi que des premiers résultats d'énergie grise et d'ACV.

L'un des constats a été que l'ACV d'un bâtiment avec les outils classique d'ACV nécessite une connaissance très pointue du bâtiment, qui n'est accessible qu'au stade DCE : mètres détaillés de tous les composants, poids des ferrailages du béton, détail des ossatures bois, longueur et diamètres des réseaux fluides, etc.

Or l'ACV n'a de sens qu'en tant qu'outil d'aide à la décision : or en DCE, toutes les décisions structurantes sont déjà prises. **Dans le but de permettre une ACV dès les premières phases de la conception** (APS, Esquisse, voire Programmation), il était nécessaire de **développer un outil permettant la saisie par familles de ratios**, permettant de modéliser rapidement des parties de bâtiments (parois, ensemble d'équipements techniques, etc.) à partir de mètres simples.

C'est pourquoi le Conseil Régional de Bourgogne et l'ADEME ont missionné Cycleco, avec Enertech, Tekhné et Betrec pour le développement d'une base de ratios architecturaux et techniques.

Ces données ont été intégrées à la **version 2 de l'outil e-LICCO**.

❖ Enjeux

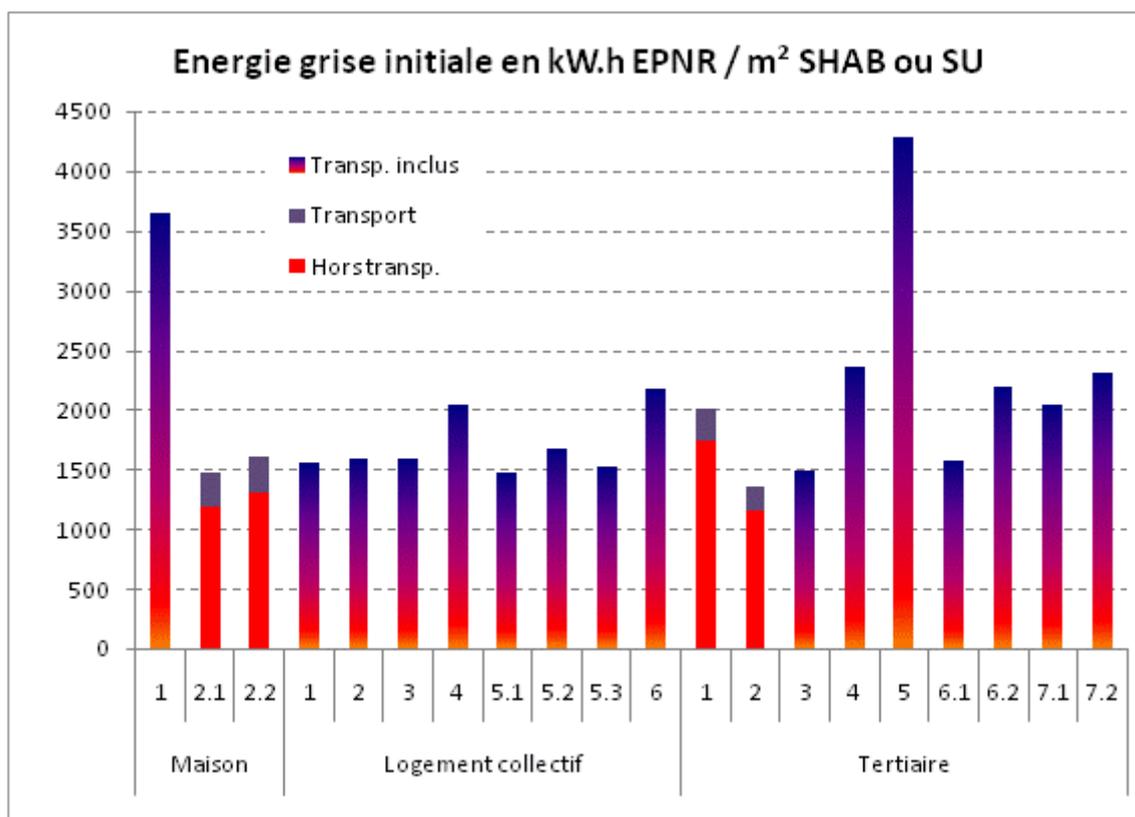
Le travail effectué dans le cadre des appels à projets permet déjà de donner des premiers ordres de grandeur.

Dans ce qui suit nous présentons des résultats issus de modélisations réalisées par les testeurs d'e-LICCO v1, retravaillées et mises en forme pour le présent rapport. Certaines études réalisées avec e-LICCO v2 sont également citées, afin d'élargir le panel. Nous avons écarté certaines études qui semblent incomplètes (résultats anormalement faibles).

Les études réalisées portent sur 15 opérations, certaines avec des variantes (20 variantes au total).

Energie grise initiale

On présente ici l'impact énergétique de la phase de construction (production des matériaux, transport et mise en œuvre). Cet impact est présenté en énergie primaire non renouvelable rapporté à la surface habitable ou utile du bâtiment.



Graphique des résultats d'énergie grise initiale obtenus sur 15 opérations modélisées dans le cadre des tests de l'outil e-LICCO v1

N'ayant pas pu accéder pour les besoins de ce rapport aux résultats détaillés des études, nous ne pouvons expliquer les valeurs très élevées atteintes pour les projets Maison 1 et Tertiaire 5.

Les autres études arrivent à des résultats compris **entre 1 300 et 2 300 kW.h EPNR / m² SHAB/SU** (kW.h d'énergie primaire non renouvelable par m² SHAB ou SU). La moyenne sur tous les résultats est à 2 000 kW.h EPNR / m² SHAB/SU (1 800 si l'on exclut les deux valeurs supérieures à 3 000).

On note qu'il n'y a pas de corrélation très nette entre les **bâtiments en ossature bois** et les **bâtiments en béton** sur l'ensemble de l'échantillon. L'écart est cependant visible dans les études de variantes. Par exemple, la variante de logement 5.1 est structure béton, mur ossature bois et planchers bois-béton collaborants, et la variante 5.2 est tout en béton. A performance égale, on passe de 1470 à 1670 kW.h EPNR / m² SHAB/SU soit **une augmentation de 14% pour la version en béton**.

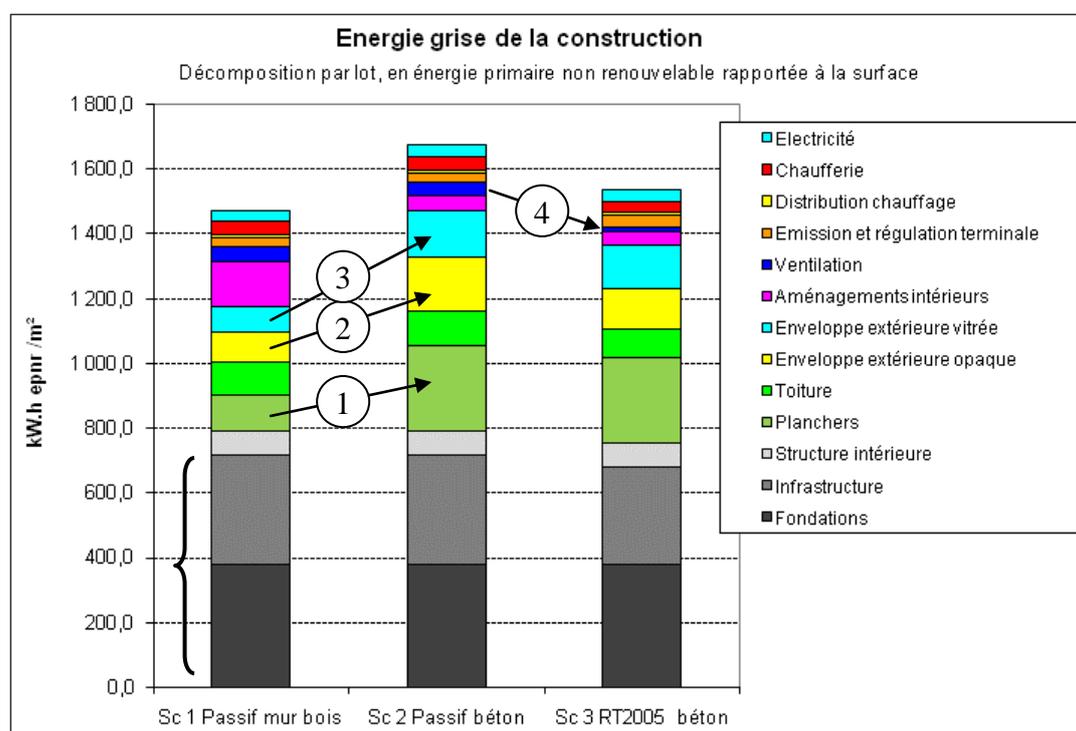
Il apparaît que des paramètres externes au mode constructif ont plus l'impact que le mode constructif lui-même : ainsi la présence d'un **parking enterré**, ou encore d'**importants travaux de VRD**, peut représenter une part très importante de l'impact énergie grise initiale. Ce type de paramètre rend très difficile la comparaison entre elles d'opérations différentes (sur quelle unité fonctionnelle ?). **C'est pourquoi il apparaît que l'intérêt de l'ACV réside avant tout dans la comparaison de variantes entre elles, sur la base d'un même programme** (fonction identique), plus que dans la comparaison d'opérations entre elles.

La variante de logement 5.3 est au **niveau d'isolation RT2005 en simple flux**. La comparaison avec la variante 5.2 (**passive, en double flux**), montre que cette dernière a un impact énergie primaire non renouvelable supérieur de 9%. On verra par la suite (page 158, Analyse du cycle de vie complet) que cet écart initial est évidemment rapidement compensé en phase d'utilisation du bâtiment.

On note également que les opérations tertiaires 1 et 2 sont issues de l'analyse de deux Esquisses répondant au même programme (en phase concours). **On voit ici tout l'intérêt que représente la réalisation d'une ACV au stade Concours**, en vue d'un choix éclairé sur les choix constructifs.

Les autres variantes testées sont la suppression de l'installation photovoltaïque (maison 2.1 et 2.2, tertiaire 6.1 et 6.2, ainsi que 7.1 et 7.2).

Si l'on rentre dans le détail, pour l'opération de logement 5, la décomposition par poste pour les trois variantes se présente ainsi (la décomposition est basée sur la structure de la version 2 d'e-LICCO, avec laquelle le calcul a été réalisé) :



Répartition de l'énergie grise initiale d'un bâtiment de logement collectif R+5 avec deux niveaux de sous-sol, pour trois variantes : bâtiment passif avec mur ossature bois et plancher bois béton collaborant, menuiseries bois / bâtiment passif tout béton, isolé en PSE et menuiseries PVC / bâtiment RT2005 avec le même procédé constructif, moins isolé et en ventilation simple flux.

Ce qui frappe en premier lieu, c'est que 40 à 50% de l'énergie grise se situe ici dans les fondations et l'infrastructure (jusqu'au plancher bas inclus).

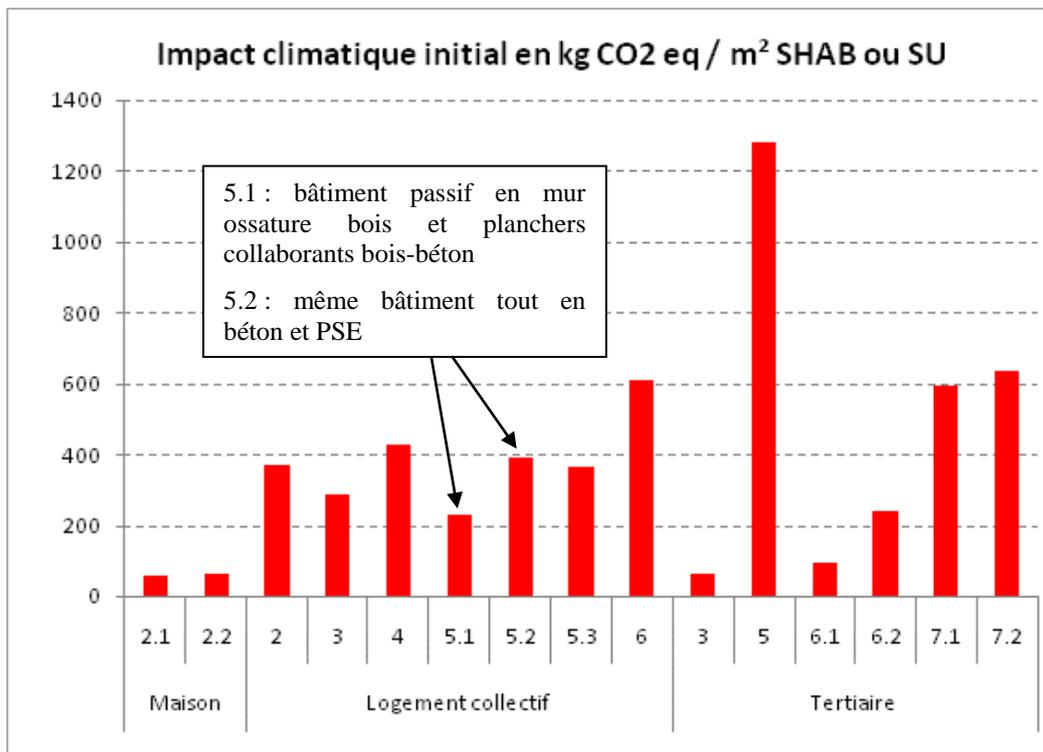
Ce détail permet également de distinguer :

- ✓ l'impact des planchers bois collaborants (variante 1) par rapport aux dalles béton (variante 2 et 3) : flèche 1, poste « planchers ».
- ✓ les murs ossature bois (variante 1) par rapport aux murs béton isolés en polystyrène (variante 2 à performance égale) : flèche 2, poste « enveloppe extérieure opaque ».
- ✓ les menuiseries bois (variante 1) par rapport aux menuiseries PVC (variante 2 et 3) : flèche 3, poste « enveloppe extérieure vitrée ».

- ✓ la différence entre ventilation double flux centralisée (variante 1 et 2) par rapport à la ventilation simple flux (variante 3) : flèche 4, poste « Ventilation ».

Impact climatique initial

On s'intéresse maintenant à l'impact de la construction sur le climat (production des matériaux, transport et mise en œuvre). Cet impact est exprimé en kg d'équivalent CO2 (impact climatique sur 100 ans), rapporté à la surface du bâtiment.



Graphique des résultats d'impact climatique initial obtenus sur 10 opérations modélisées dans le cadre des tests de l'outil e-LICCO v1

Toutes les données n'étant pas disponibles sur cet indicateur, le panel se trouve réduit. Nous manquons également de variables explicatives sur l'impact important de l'opération tertiaire 5.

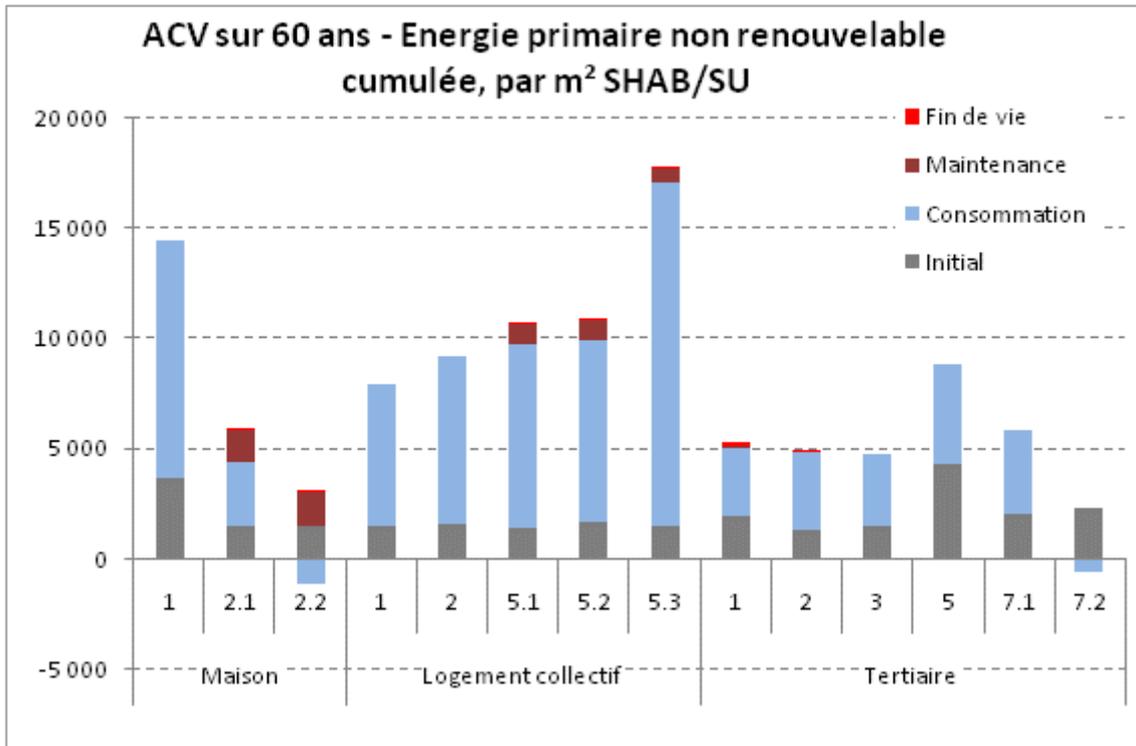
De la même façon que pour l'impact énergie, il ne ressort pas de règle générale selon les procédés constructifs. En revanche, on note que l'écart se creuse entre la variante 5.1 avec mur ossature bois et planchers bois-béton collaborants, et la variante 5.2 tout en béton, puisque l'écart n'est plus de +14% comme sur l'énergie mais de **+70% d'impact climatique pour la structure béton !**

Ce constat montre la nécessité de mener **les Analyses de Cycle de Vie sur plusieurs critères**, dont a minima l'énergie primaire non renouvelable et l'impact climatique, mais également d'autres indicateurs présents dans les outils d'ACV dont e-LICCO.

Cycle de vie complet

Si l'on s'intéresse à présent au cycle de vie complet, il faut prendre en compte les impacts initiaux, la consommation d'énergie et d'eau au cours de la vie, mais aussi la maintenance (remplacement des matériaux à leur fin de vie) et la fin de vie du bâtiment.

NB : les hypothèses de durées de vies des bâtiments ont toutes été ramenées à 60 ans pour rendre la comparaison possible.



Analyse de cycle de vie sur 60 ans de 10 projets. Indicateur énergie primaire non renouvelable cumulée, par m² de surface habitable ou utile.

La consommation d'énergie reste l'impact prépondérant sur cet indicateur, suivi par l'énergie grise initiale. Pour autant, selon les opérations, la maintenance et la fin de vie ne sont pas négligeables (4 à 25%). Ceci justifie de s'intéresser à l'intégralité du cycle de vie.

Selon l'usage et le niveau de performance, **l'énergie grise initiale représente entre 6 et 40 ans de consommations à l'usage** (hors bâtiments à énergie positive). La moyenne sur ce panel d'opérations (toutes performantes) est à 24 années.

La comparaison entre les variantes passives du bâtiment de logement 5 (5.1 et 5.2) et la variante RT2005 (5.3) montre clairement que le surplus d'énergie grise initiale (plus d'isolant, ventilation double flux) est très vite compensé par les consommations d'énergie. **Le bilan sur 60 ans montre un impact supérieur de plus de 60% pour la variante 5.3 (RT2005 en béton) par rapport à la variante 5.2 (passif en béton)**. L'investissement dans la performance énergétique est donc largement rentable d'un point de l'analyse de cycle de vie.

Enfin, on note qu'il ne suffit pas d'être à énergie positive en phase d'utilisation pour rembourser l'énergie grise de la construction, et encore moins si l'on ajoute la maintenance et la fin de vie.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Analyse de cycle de vie			
	A proscrire	Minimum	Optimal
ACV	Proscrire le polystyrène extrudé aux HFC Eviter le polyuréthane (surtout en intérieur)		Réaliser une ACV dès les premiers stades de la conception, idéalement dès le concours.

❖ *Pour aller plus loin*

- Outil e-LICCO : <http://e-licco.cycleco.eu/>

3 Retours d'expérience du chantier

3.1 Généralités

L'objet de cette partie 3 est de présenter les difficultés et problèmes rencontrés lors du chantier. L'objectif est de tenter de comprendre pourquoi ces problèmes n'étaient-ils pas prévus lors de la conception, et comment ont-ils été résolus. On cherchera à **dégager les leçons de ce qui a bien fonctionné et ce qui a moins bien fonctionné**, afin de permettre au lecteur, Maître d'ouvrage, architecte ou bureau d'étude, d'éviter ces écueils dès la conception ou dans le cadre de son suivi de chantier.

Avant d'entrer dans le détail par sujet technique, il convient d'aborder deux sujets sensibles : la phase d'analyse des offres et de négociation, et l'étendue des missions accordées à la maîtrise d'œuvre en phase chantier :

❖ *L'analyse des offres*

C'est la phase du projet où l'on choisit la ou les entreprises qui réaliseront le chantier (assistance aux contrats de travaux, ou phase ACT dans le jargon de la Maîtrise d'œuvre). Le choix est fait par le Maître d'ouvrage, sur la base des critères définis dans le règlement de la consultation et de l'analyse des offres réalisée par la Maîtrise d'œuvre. L'enjeu est de taille.

La question que le Maître d'ouvrage doit se poser, est principalement **quelle pondération appliquer à la qualité technique d'une part et au prix d'autre part**.

Les écueils à éviter à cette phase sont les suivants :

- ✘ **Retenir sans discernement le moins disant** ne peut qu'encourager une forme de « dumping » de la qualité. L'analyse réalisée par la maîtrise d'œuvre doit permettre d'identifier les prix anormalement bas, c'est à dire les prix pour lesquels il n'est pas possible que l'entreprise réalise les prestations demandées ;
- ✘ **Accepter en phase de négociation des propositions d'économies remettant en cause la cohérence du projet**. La Maîtrise d'œuvre et l'AMO énergie, le cas échéant, doivent impérativement être consultés avant de valider une moins-value de cette nature. Une analyse en coût global semble un outil d'aide à la décision utile pour faire des choix éclairés si le budget de l'opération n'est pas respecté à l'ouverture des plis.

Il faut également reconnaître que **les entreprises peuvent être force de proposition**, sur des techniques constructives nouvelles, et il convient de rester à leur écoute en phase de négociation.



Exemple concret :

Sur une opération suivie dans le cadre des Appels à Projets, une économie importante a pu être réalisée à performance égale suite au passage en prémurs isolants et émission par batteries sur le soufflage de la ventilation double flux, sur la proposition d'une entreprise générale.

On peut citer les bonnes pratiques suivantes :

- ✓ Pour le Maître d'ouvrage : encourager la qualité des offres, en **valorisant l'expérience des entreprises qui ont déjà réalisé des chantiers BBC, Passifs, etc.**, qui disposent de qualifications, et en prévoyant dans le règlement de la consultation une **pondération importante sur la note technique** ;
- ✓ Pour la Maîtrise d'œuvre : identifier les **postes anormalement bas dans les offres des entreprises**, et les expliciter dans le cadre du retour fait aux entreprises : elles pourront ainsi soit revoir leur offre, soit accepter de maintenir leur offre, mais en ayant conscience que c'est un geste commercial (ce qui change tout dans la suite du chantier : l'entreprise n'est pas prise en tenailles entre un CCTP exigeant et un chiffrage sous-estimé, mais assume en maintenant son offre qu'elle a bien pris conscience de ce qui est exigé) ;
- ✓ Bien souvent, les prix incohérents ont pour source une incompréhension du niveau de performance de l'opération. Par manque de temps, les entreprises ont tendance à chiffrer des prestations standard. C'est pourquoi il est important que **la rédaction des CCTP et des DPGF explicite et mette en valeur les points qui sortent de l'ordinaire** ;

❖ *La mission de suivi du chantier*

On regrette parfois un manque de suivi des chantiers par la maîtrise d'œuvre, notamment par les bureaux d'étude. Ce suivi est pourtant indispensable pour la réussite d'une opération performante.



Exemple concret :

Sur une opération suivie dans le cadre des Appels à Projets, l'entreprise a proposé de qui propose de passer la ventilation en dalle (ce qui est en soi une solution intéressante).

Le BE n'ayant pas de mission de chantier, la solution a été validée sans un contrôle des aspects techniques. Or le réseau a été sous-dimensionné, et comportait des coudes à 90°, le tout générant de fortes pertes de charges. Mais dès que la dalle a été coulée, tout cela devient irréversible. Résultat : des pertes de charges énormes, le débit voulu n'était pas atteint, et ce avec une surconsommation électrique importante.

Les raisons peuvent être multiples, mais on peut regretter :

- ✗ Un manque de pratique de terrain de certains bureaux d'étude ;
- ✗ Sans savoir si c'est l'œuf qui a fait la poule ou l'inverse, on peut déplorer de même que certains Maîtres d'ouvrages privés ne donnent pas de mission de chantier aux BE, et que par ailleurs dans bien des cas les honoraires prévus pour le suivi de chantier par le BE sont insuffisants pour assurer une présence régulière ;
- ✗ Les mêmes remarques s'appliquent aux économistes et BE structure, dont la présence sur le chantier est très variable.

Les bonnes pratiques à encourager sont donc :

- ✓ **Réintroduire les BE sur les chantiers.** Leur confier le contrôle de la mise en œuvre, de la qualité de l'exécution, la vérification des réglages et du bon fonctionnement (avec des mesures). Ils doivent aider l'entreprise dans la mise au point des installations.
- ✓ Tout ceci doit faire l'objet de **missions rémunérées**, et pour lesquelles le Maître d'ouvrage exigera en retour une présence réelle et un suivi technique de qualité.
- ✓ Réaliser une **réunion de début de chantier** avec l'ensemble des entreprises :
 - Expliciter les différences entre l'opération et une opération classique. Attirer l'attention de chaque entreprise sur les points particuliers la concernant. Sans cela, les entreprises risquent de faire « comme d'habitude ».
 - Aborder la problématique de l'étanchéité à l'air. Expliciter le niveau de performance visé, la réalisation et le phasage des tests d'infiltrométrie. Préciser qui fait quoi et identifier un coordinateur (l'Architecte, le BE, ou une entreprise)

❖ *La mission d'exécution*

Un des enjeux du chantier est également la **phase d'Exécution** (EXE « 2 », dans le jargon, par opposition à l'EXE « 1 » réalisée avant la consultation). Dans un bâtiment à basse consommation, où **l'efficacité de bon nombre d'équipements dépend de leur dimensionnement**, l'EXE prend une importance capitale.

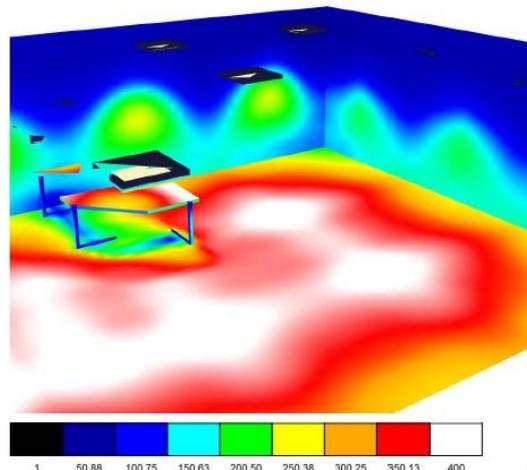
Or l'EXE réalisée par les entreprises vise rarement la performance, mais plutôt la rapidité de calcul et la réduction des coûts. On peut ainsi déplorer sur certains chantiers :

- ✗ Des détails non performants concernant l'étanchéité à l'air, ou les ponts thermiques structurels (notamment de l'isolation extérieure, mais aussi en toiture...)
- ✗ Des réseaux sous-dimensionnés, générant des surconsommations électriques des pompes et ventilateurs, voire du bruit dans les conduits de ventilation ;
- ✗ Des pompes surdimensionnées (faute d'avoir fait un calcul précis) qui ont par conséquent un mauvais rendement au point de fonctionnement réellement utile ;
- ✗ Des émetteurs ou encore des luminaires surdimensionnés (faute d'avoir fait un calcul précis au moment de répondre à l'appel d'offre), qui coûtent cher au Maître d'ouvrage ;
- ✗ etc.

Le rôle de la maîtrise d'œuvre dans son ensemble est au contraire d'**avoir une vision globale du projet**, et les moyens dans le cadre de sa mission de réaliser des dimensionnements précis, qui augmenteront la performance de l'opération tout en réduisant certains coûts.

- ✓ Il semble donc important de **confier aux Maîtres d'œuvre des missions complètes**, avec mission d'exécution ;
- ✓ En retour, le Maître d'ouvrage est en droit d'exiger un travail rigoureux, au service de la performance et du respect de l'économie du projet.

Exemple d'optimisation du nombre de luminaires par calcul Dialux en phase EXE (hors AAP)



❖ L'importance de la phase de réception

La réception est avant tout un acte juridique, par lequel le Maître d'ouvrage prend possession du bâtiment, avec ou sans réserves sur l'exécution des travaux.

L'Architecte et le BE doivent avoir vérifié auparavant la conformité des prestations au CCTP, pendant les OPR (opérations préalables à la réception). Cette phase est donc capitale à la fois sur le plan juridique, mais aussi sur le plan technique. Il n'est pas normal de constater des prestations non conformes après Réception. Nous avons pourtant eu la surprise de constater que c'était parfois le cas.



Exemple concret :

Sur une opération suivie dans le cadre des Appels à Projets, l'entreprise a proposé une variante sur la centrale double flux.

Le BE n'ayant pas de mission de chantier, la variante n'a pas été interdite, alors que l'efficacité de l'échangeur était insuffisante. Ce n'est qu'après Réception que l'AMO s'est aperçu de la dégradation de la performance. Il était alors trop tard pour agir.

Bonnes pratiques :

- ✓ **Anticiper les écueils potentiels** dès la phase préparation et la réunion de lancement du chantier ;
- ✓ Avec ou sans la mission d'Exécution à la Maîtrise d'œuvre, celle-ci doit au moins assurer le VISA de la documentation technique. L'entreprise doit pour cela transmettre les fiches techniques des produits envisagés avant leur commande.
- ✓ **Assurer une continuité d'encadrement tout au long du chantier**, du VISA aux OPR, afin de ne pas prendre les entreprises au piège à la fin du chantier. Sur un chantier bien encadré, la liste de réserve n'est que la suite logique des échanges précédents (compte rendu de chantier, puis compte rendu OPR).

3.2 Réalisation de l'enveloppe

3.2.1 Isolation, menuiseries

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	Architecte et économiste *	Épaisseurs, performance, mise en œuvre, ponts thermiques et ponts thermiques structurels

* Le BE prend souvent part en pratique au suivi de la performance de l'enveloppe, mais l'architecte et l'économiste restent responsables de ces lots.

❖ Enjeux

La mise en œuvre performante des isolants et des menuiseries ne va pas de soi. On rencontre encore des malfaçons :

- ✗ Non respect des préconisations (épaisseur, performance) ;
- ✗ Non respect des ponts thermiques (carnets de détails) ;
- ✗ Non respect des règles de mise en œuvre (DTU, DTA, avis techniques...),
- ✗ Absence de protection des ouvrages ;
- ✗ Non prise en compte des ponts thermiques structurels ;
- ✗ ...

Il appartient à la maîtrise d'œuvre de contrôler le respect du DCE et des règles de l'art sur l'ensemble de ces sujets.

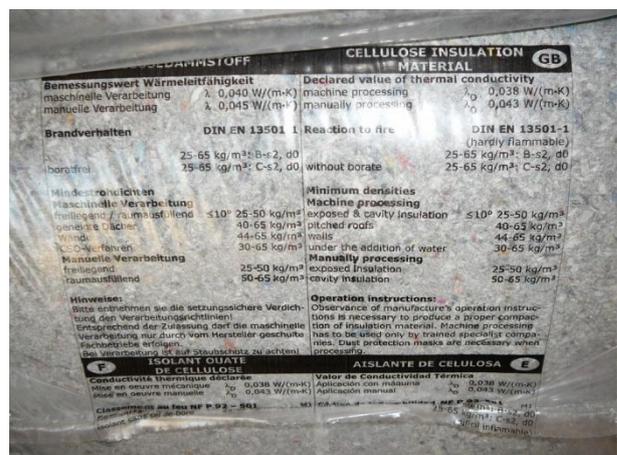
❖ Bonnes pratiques

Vérification du respect du DCE

- ✓ **Contrôler les épaisseurs** d'isolant, ainsi que leur performance (conductivité ou résistance thermique certifiée).



Vérification d'épaisseur de l'isolant



Vérification de la performance de l'isolant

- ✓ Faire respecter les préconisations du DCE en matière de **ponts thermiques structurels** (voir pour la conception le § 2.2.3).

- ✓ Vérifier le respect des préconisations du DCE en matière de Qualité environnementale (voir § 3.2.3).
- ✓ En isolation collée, veiller à ce que les plots de colle ne génèrent pas une **lame d'air ventilée**, qui réduirait fortement la performance de l'isolation.



Equerres métalliques traversant la future ITE + chute d'eaux pluviales.



Suspentes à faibles ponts thermiques structurels approvisionnés pour isolation en rampant.



Importante lame d'air formée par des plots de colle.

- ✓ Pour les menuiseries, demander **dès la phase de préparation du chantier** les certifications AEV (notamment le classement A* d'étanchéité à l'air) et les performances (U_g , U_w , facteur solaire...) selon CCTP.
- ✓ Vérifier dans la note de calcul du U_w l'hypothèse faite sur le ψ_g (voir définition et enjeu § 2.2.5) : une valeur faible de l'ordre de 0,05 W/m.K signifie qu'il est prévu un **intercalaire warm edge** : vérifier alors sa présence effective sur les menuiseries du chantier...

Respect des règles de l'art :

- ✓ **Interdire tout manque d'isolant.** Chaque défaut crée un pont thermique, sur lequel il y a un risque de condensation, voire de pathologie.
- ✓ Une vigilance particulière doit être accordée à la liaison entre l'isolation enterrée des soubassements et l'isolation par l'extérieur, pour ne pas créer un pont thermique sous le profil de départ.



Isolation du soubassement et ITE (hors AAP)



Isolant écrasé par les rosaces du chevillage

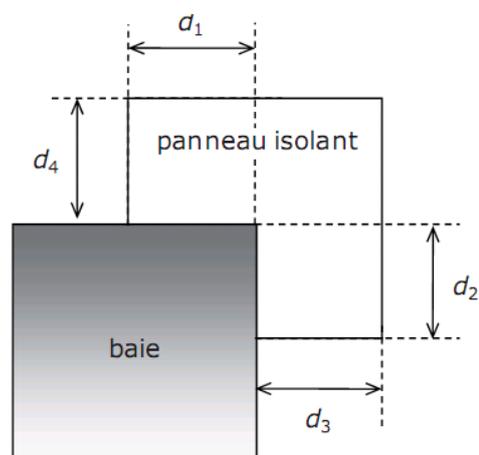


Défaut de protection des ouvrages : isolant dégradé.

- * Attention à la mise en œuvre des isolants souples : en ITE **les chevilles ne doivent pas écraser l'isolant**. En isolation par l'intérieur, la fixation de l'isolant doit empêcher qu'il se tasse dans le temps.
- * Exiger une **protection des ouvrages** rigoureuse et permanente. En cas de pluie, la plupart des isolants sont abimés. En tout état de cause, on ne peut enfermer dans un complexe de paroi qu'un isolant parfaitement sec, sinon le temps de séchage peut être de plusieurs années !
- * Attention à l'intégration des descentes de chéneaux : interdire les saignées dans l'isolant pour les intégrer (pont thermique), attention également au risque de condensation (les eaux pluviales étant froides même en été, risque de condensation de l'humidité venant de l'intérieur comme de l'extérieur).
- ✓ Décrire et faire respecter les règles de l'art, notamment pour les techniques encore considérées comme non conventionnelles, comme l'isolation par l'extérieur.



Pose non conforme aux règles de l'art : joint en angle de la menuiserie, et chevillage en joint non conforme pour un isolant souple (hors AAP).



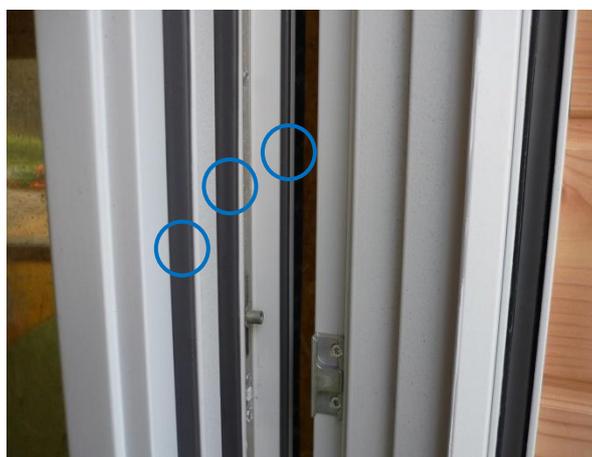
Pose correcte « en L » de l'isolant à l'angle d'une menuiserie (source : CPT 3709³¹)

- ✓ Pour les menuiseries, **vérifier le sens de pose des vitrages** : ceux-ci sont généralement livrés avec l'indication sur l'étiquette du côté où elle doit se situer (intérieur ou extérieur). Si les étiquettes ne sont plus présentes, on peut vérifier la cohérence entre les menuiseries avec le « test de la flamme » : il s'agit de présenter la flamme d'un briquet devant la vitre, et de repérer la couleur des reflets : les surfaces traitées (basse émissivité, normalement sur la vitre intérieur côté extérieur, donc deuxième reflet ; contrôle solaire, normalement sur la vitre extérieure, côté intérieur, donc 3^{ème} reflet pour un double vitrage, 5^{ème} reflet pour un triple).

³¹ CPT : Cahier de Prescription technique, ou e-Cahier du CSTB. Le n°3709 de mai 2012 porte sur les « Systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé : principe de mise en œuvre autour des baies – liaison avec les fenêtres »



*Test à la flamme :
vitrage à contrôle
solaire.*



Menuiserie A4 avec triple joint



*Menuiserie A4 avec joint
unique large et en
compression (hors AAP)*

- ✓ Vérifier la **cohérence entre la certification AEV et les joints des menuiseries** livrées sur le chantier. En principe, une menuiserie classée A4 dispose de deux joints, ou alors d'un joint unique de forte largeur et mis en forte compression.

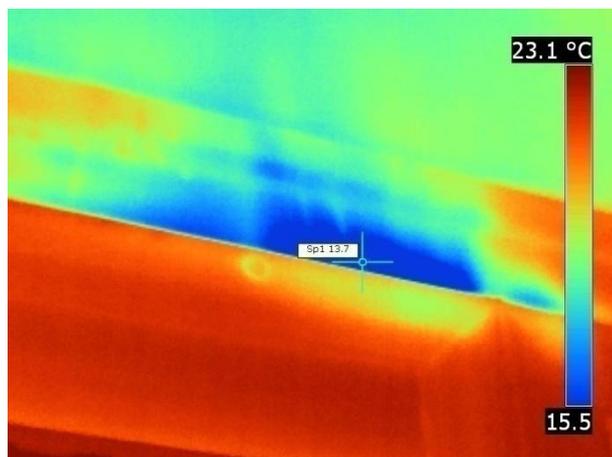
❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Suivi de l'isolation et des menuiseries en phase chantier			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Isolation	Manques d'isolant, Non respect des règles de l'art.	Vérifier épaisseur et performance, respect des préconisations sur les ponts thermiques structurels (chevilles, équerres...)	Vérifier la qualité environnementale des isolants (PSE non extrudé aux HFC...)
Menuiseries		Exiger le certificat AEV, le calcul du Uw, etc. Vérifier les intercalaires warm edge le cas échéant	Contrôler le sens de pose des vitrages.

✓ Réalisation des tests d'infiltrométrie :

La certification BBC Effinergie, et à présent la RT 2012, impliquent la réalisation d'un test d'infiltrométrie en fin de chantier. Celui-ci est nécessaire, mais pour autant, si des fuites sont constatées, il est souvent trop tard pour y remédier, car toutes les finitions sont réalisées.

C'est pourquoi il est pertinent de faire réaliser un **test d'infiltrométrie intermédiaire**, dès que les menuiseries (et freine vapeur le cas échéant) sont posés (hors d'air). Pour un bâtiment de taille importante on peut réaliser le test sur une partie du bâtiment, avant la pose de tout doublage. Un des enjeux les plus importants reste la mise en œuvre des menuiseries et des occultations : il est alors encore possible à ce stade (avant pose des doublages) d'ajouter une membrane, ou de reprendre des points singuliers.



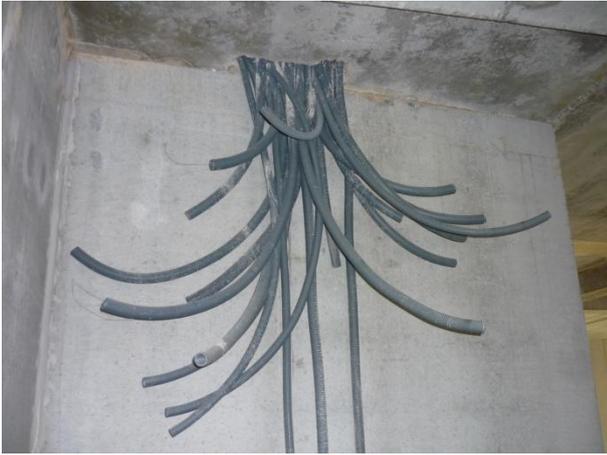
Ci-contre : thermographie infrarouge d'une fuite entre dormant et bâti, suite à un mauvais collage de la membrane d'étanchéité à l'air (hors AAP).

Le test final reste nécessaire, car entre ce test intermédiaire et la fin du chantier, **de nombreuses interventions peuvent encore dégrader la performance de l'étanchéité à l'air**. Notamment tous les réseaux fluides traversant l'enveloppe doivent être traités soigneusement, les réseaux électriques doivent être mis en place sans dégrader la frontière d'étanchéité à l'air (particulièrement dans le cas des freine vapeur).

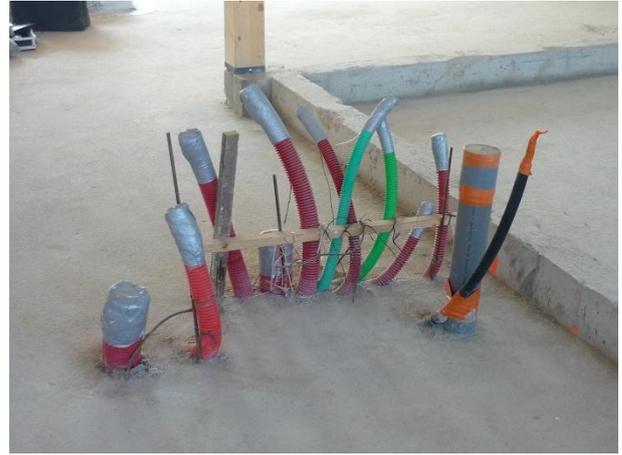
Ainsi il est important que le résultat du test intermédiaire soit plus performant que l'objectif, car **très généralement le test final est moins bon**. L'attention de toutes les entreprises doit être attirée sur le risque de dégradation entre le test intermédiaire et le test final.

❖ *Points de vigilance*

- ✗ On rappelle que **les agglo sont poreux même en partie courante**. Il ne suffit pas de réaliser des bons joints, un enduit est nécessaire sur toute la surface. Bien soigner les raccords avec les dalles et les refends.
- ✗ On rappelle également la difficulté de pose de la membrane sur les équerres (cas de la pose en applique intérieure (cf § 2.2.6).
- ✗ Pour la pose du freine-vapeur en ossature bois, ne pas utiliser une **agrafeuse à frappe**, qui risque de tout déchirer.
- ✓ **Pour les réservations en dalle** : écarter les réseaux entre eux en les maintenant en place pendant le coulage, pour que le béton (bien liquide) puisse entourer chaque réseau. Ceci n'est pas toujours faisable pour les fourreaux électriques qui sont en grand nombre au droit d'une armoire, c'est pourquoi les tableaux électriques doivent être prévus dans le volume chauffé, ce qui évite ce problème.



Faisceau de fourreaux trop proches : étanchéité à l'air impossible.



Fourreaux maintenus écartés pendant le coulage par un support. Bonne étanchéité à l'air.

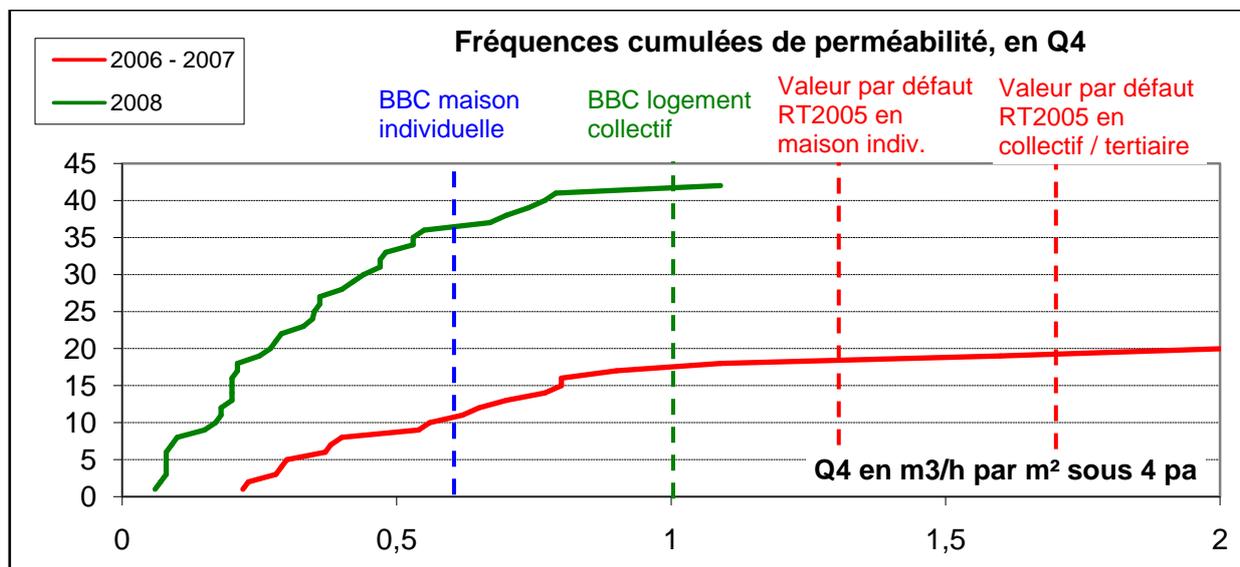
- ✘ Ne pas peindre les joints des menuiseries. S'il est prévu de peindre des menuiseries sur le chantier, prévoir une protection sur les joints.
- ✘ **Effectuer le réglage des menuiseries** avant le test d'infiltrométrie. Bien souvent des fuites sont constatées même sur des menuiseries classées A4, faute d'avoir réalisé le réglage : les joints sont alors insuffisamment compressés, et il reste des fuites.

❖ Résultats obtenus dans le cadre des Appels à Projets

Avant de rentrer dans les statistiques, il est intéressant de noter que **le simple fait de pratiquer des tests d'étanchéité à l'air a généré une réelle implication des entreprises**. Le fait qu'une mesure objective soit prévue, avec un objectif ambitieux, a permis de sensibiliser les entreprises à cet enjeu, de les motiver par le risque d'avoir à reprendre leur ouvrage si l'objectif n'était pas atteint. Et bien souvent les entreprises se sont prises au jeu, avec succès.

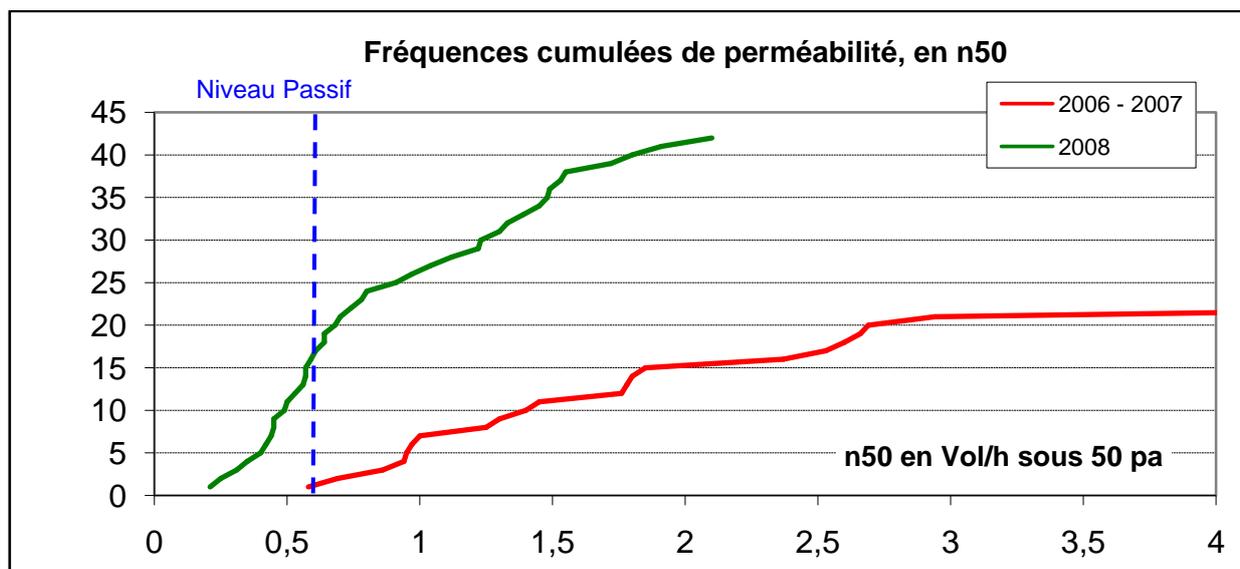
Les graphiques ci-dessous présentent les résultats des tests d'infiltrométrie finaux sur les opérations suivies dans le cadre des Appels à Projets.

Ces statistiques sont basées sur 25 rapports de tests sur les Appels à Projets 2006 et 2007, et 42 rapports sur l'Appel à Projets 2008 (tous les tests finaux n'ont pas été communiqués à ce jour).



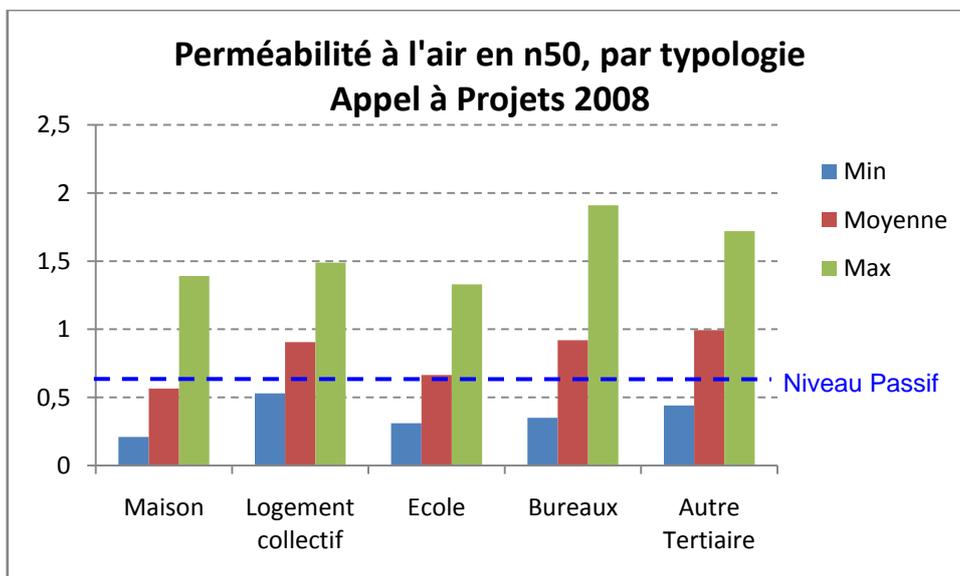
Courbe de fréquences cumulées des résultats de perméabilité, exprimé en Q4, pour les Appels à Projets 2006 et 2007 (en rouge), et pour l'Appel à Projets 2008 (en vert).

On peut lire sur ce graphique que seules 10 opérations sur 25 (40%) ont atteint un Q4 inférieur à 0,6 m³/h par m² de surface déperditive hors plancher bas sous 4 Pa dans les AAP 2006 et 2007, contre 36 sur 42 (85%) dans l'AAP 2008. **Ces deux courbes montrent donc le progrès très net réalisé entre ces Appels à Projets.** On se rappelle en effet qu'en 2006 l'étanchéité à l'air était un sujet presque totalement inconnu en France.



Même graphique, mais exprimé en n50.

Ce deuxième graphique indique les résultats exprimés en n50. On voit que 16 opérations sur 42 ont atteint effectivement le niveau Passif de $n50 \leq 0,6$ vol/h sous 50 Pa, soit 38% dans l'Appel à Projet 2008. Ceci est très honorable, dans la mesure où les premiers de ces tests ont été pratiqués en 2009. On note également l'importante progression depuis les Appels à Projets 2006 et 2007, où une seule opération avait atteint cette performance.



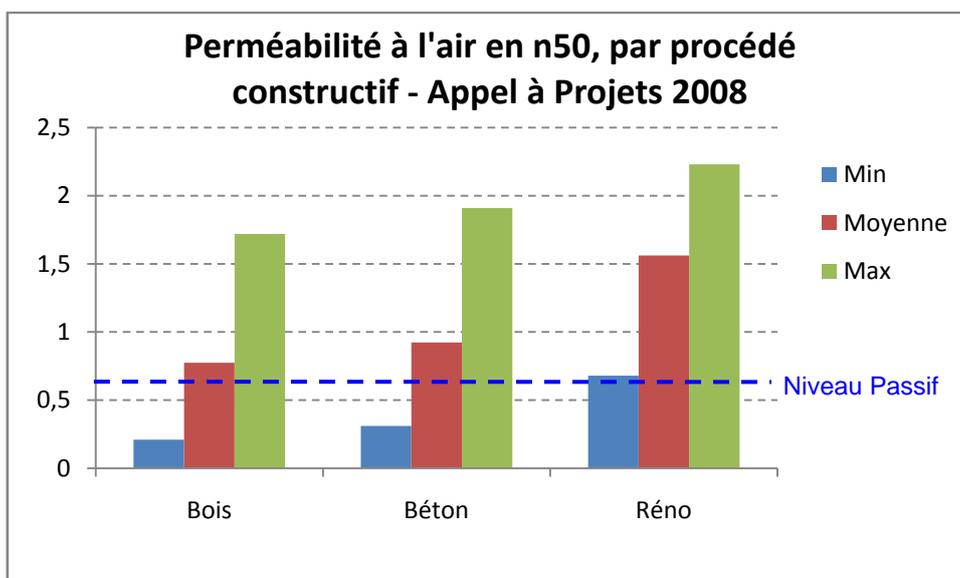
Valeur minimale, moyenne et maximale de n50 atteinte par catégorie de bâtiments neufs, sur l'Appel à Projets 2008.

NB : le graphique est basé sur 9 maisons, 6 logements collectifs, 5 écoles, 3 bâtiments de bureaux et 13 autres bâtiments tertiaires. Les opérations de rénovation n'ont pas été prises en compte ici.

On voit ici l'écart important entre les opérations les plus performantes et les moins performantes. **Il y a donc un enjeu important à prendre le sujet de l'étanchéité à l'air au sérieux**, et de l'intégrer dès la conception (c'est là que l'on obtient les meilleurs résultats).

Bien que l'échantillon soit assez restreint, une tendance semble se dégager de ce graphique : les meilleures performances moyennes sont atteintes pour les maisons individuelles, et pour les écoles. Il est intéressant de noter que ces typologies de bâtiment étaient majoritairement constituées de petits bâtiments à ossature bois.

Si l'on s'intéresse de la même façon aux procédés constructifs, en intégrant les opérations en rénovation :



Valeur minimale, moyenne et maximale de n50 atteinte par procédé constructif, sur l'Appel à Projets 2008.

NB : le graphique est basé sur 25 bâtiments à mur ou ossature bois, 11 bâtiments en construction traditionnelle, et 7 rénovations.

Sur l'échantillon considéré, les constructions à ossature bois ont atteint de meilleures performances que les constructions traditionnelles. Ceci est étonnant, car a priori il est plutôt plus facile de réaliser une bonne étanchéité à l'air avec des voiles béton. Il apparaît que **les entreprises réalisant des constructions à ossature bois étaient particulièrement sensibilisés, formés et compétentes** sur la question de l'étanchéité à l'air. Celle-ci a en effet une importance cruciale pour la pérennité des bâtiments à ossature bois, et fait donc partie de la démarche de qualité de la construction bois depuis son origine.

Comme on pouvait s'y attendre, **c'est en rénovation qu'il est le plus difficile d'atteindre une performance élevée.** Il faut noter que les tests en rénovation de logements collectifs sont nécessairement réalisés sur un échantillon de logements (en site occupé) : le résultat inclut donc les **infiltrations « parasites » de logement à logement.** Celles-ci ne nuisent pas à la performance globale du bâtiment. Il n'est malheureusement pas possible de réaliser un test global de ces bâtiments, car cela impliquerait de maintenir toutes les portes palières ouvertes et toutes les fenêtres fermées pendant la durée du test, ce qui est irréaliste en site occupé.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Suivi de l'étanchéité à l'air en phase chantier			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Etanchéité à l'air	L'improvisation sur chantier !	<p>Valider les carnets de détail en phase de préparation du chantier.</p> <p>Valider les références des produits utilisés, notamment les freine-vapeur et membranes pour la liaison dormant-bâti.</p> <p>Réaliser un test d'infiltrométrie intermédiaire en plus du test final.</p> <p>Ecarter les réservations en dalle</p>	<p>Réaliser une réunion de lancement en début de chantier, pour aborder les particularités de l'opération, dont l'étanchéité à l'air.</p> <p>Faire régler les menuiseries avant le test d'infiltrométrie.</p>

3.2.3 *Eléments de Qualité Environnementale*

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BE qualité environnementale	Bonne mise en œuvre des isolants non traditionnels Suivi des exigences du DCE

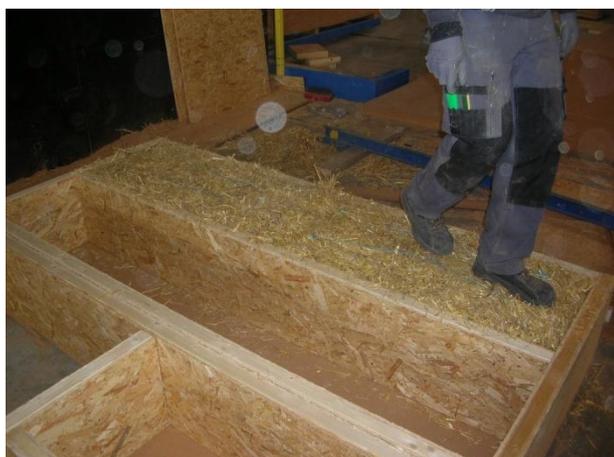
❖ *Points de vigilance*

Respect des préconisations du CCTP

- ✓ Conformément au DCE, demandes les **fiches techniques des matériaux** pour vérifier le respect des critères définis (étiquette A+, classement E1, pas de polystyrène extrudé au HFC,...).

Suivi de la mise en œuvre d'isolants bio-sourcés

- ✓ S'assurer de la **densité correcte** (selon Avis Technique) pour la ouate insufflée en caisson.
- ✓ Pour **éviter que la ouate en vrac dans les combles ne soit déplacée par le vent** :
 - prévoir un pare-pluie (HPV) sous les tuiles, qui est également indispensable pour éviter que de la condensation se formant sous les tuiles ne tombe sur l'isolant ;
 - Former une croûte en surface de la ouate, par pulvérisation d'eau.
- ✓ Pose de la **paille en ossature bois** : aujourd'hui il y a trois stratégies principales pour la mise en œuvre de la paille :
 - La paille porteuse ne nécessite pas d'ossature bois : peu de sujétions de découpe des bottes. La mise en œuvre nécessite une bonne expérience (mise en compression des bottes, etc.) ;
 - La paille peut être intégrée à l'ossature bois sur le chantier : ceci implique des coupes, qui peuvent nécessiter beaucoup de temps de mise en œuvre ;



- La paille peut être intégrée à des caissons, préfabriqués en atelier. Cela permet un gain de temps, facilite la protection des ouvrages, et évite d'avoir des chutes de paille sur le chantier (risque de départ d'incendie).

Ci-contre : intégration des bottes de paille dans des caissons bois en atelier (hors AAP).

Suivi de la mise en œuvre de matériaux intérieurs sains

- ✓ La mise en œuvre des sols en (vrai) linoléum est plus complexe que celle des sols PVC. Il faut tenir compte d'une dilatation différente. La pose doit donc être réalisée par une entreprise compétente en la matière.
- ✓ L'entretien des sols linoléum diffère également des sols PVC : ils peuvent être dégradés s'ils sont lavés à grande eau. L'information des utilisateurs et du personnel d'entretien est nécessaire.

3.3 Mise en œuvre des systèmes

3.3.1 Généralités

Nous avons été frappés par le nombre de chantiers concernés par des **dysfonctionnements voire des malfaçons sur les lots Fluides**. Il semble que ces difficultés peuvent avoir pour origine :

- Une technologie récente, et encore mal maîtrisée ;
- Une mauvaise mise en œuvre par faute de formation ou d'expérience de l'entreprise ;
- Une trop grande complexité technique dans la conception des systèmes.

Beaucoup de difficultés observées sur les chantiers concernaient **la ventilation** (aussi bien en simple flux qu'en double flux). Comme nous l'avons vu dans la partie conception, c'est pourtant un enjeu très important, notamment dans les bâtiments performants et étanches à l'air.

Mais paradoxalement, il semble que ce domaine est actuellement un des « parents pauvres » du bâtiment, notamment sur les chantiers de logements. Il faut se souvenir que la ventilation a longtemps été réalisée par les électriciens, avant d'être reprise dans le lot chauffage. Il en résulte sans doute un problème d'identité : le métier de « ventilatoriste » (?) n'a même pas de nom précis...

C'est pourtant un sujet complexe et passionnant, demandant une mise en œuvre soignée, et qui mériterait une formation professionnelle spécifique, ainsi que des entreprises spécialisées dans ce domaine (il en existe déjà).

L'objectif de ce qui suit est de **tenter de comprendre les difficultés rencontrées**, afin de permettre aux concepteurs et aux entreprises de concevoir et de réaliser de façon plus performante demain.

3.3.2 Ventilation

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET fluides	S'assurer que la maintenance est possible. Réaliser un test d'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation.

❖ *Bonnes pratiques*

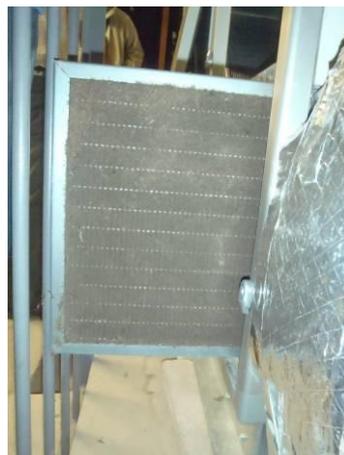
Local CTA

- ✓ Vérifier la **conformité des équipements au CCTP** : faible consommation électrique des ventilateurs, efficacité des échangeurs, présence d'un by-pass le cas échéant, clapets coupe feu à faibles pertes de charges, etc. Viser les fiches produits avant la commande.
- ✓ S'assurer que la CTA n'a pas été déformée à la livraison, ou que l'échangeur n'a pas été endommagé.
- ✓ Vérifier le raccordement de l'évacuation des condensats. Celui-ci doit être réalisé avec un siphon, sinon cela fait une fuite d'air importante et une remontée potentielle d'odeurs dans le flux d'air.
- ✓ **Vérifier que l'on peut accéder aux filtres** (ouverture complète des portes) et que l'on a la place pour les retirer.

- ✓ Dans le cas de **CTA en faux plafond**, prévoir un faux plafond démontable, avec des rails amovibles. Ou mieux, prévoir une large trappe pourvue d'un traitement acoustique.



Les suspentes gênent l'ouverture de la porte, et empêchent de sortir les filtres.



Filtre impossible à sortir. Garde corps à modifier ou déplacer.



Filtre difficile à sortir : prévoir un rail amovible de faux plafond

Réseaux de ventilation :

- ✓ Vérifier la **cohérence des diamètres** mis en œuvre (afin de ne pas dépasser les vitesses d'air préconisées, pour limiter le bruit et les pertes de charges).
- ✓ Vérifier que tous les réseaux qui doivent l'être sont **calorifugés** : c'est le cas notamment des réseaux extérieurs de reprise et de soufflage entre la CTA double flux et le bâtiment.
- ✓ S'assurer de la présence de **supports antivibratiles**, résilient ou autre traitement acoustique des supports.
- ✗ **Proscrire les piquages par découpe et collerette** : ces piquages sont des sources importantes d'inétanchéité à l'air, et génèrent de plus de pertes de charges plus importantes car la section est réduite, et de la poussière va s'accumuler dans le temps sur les bavures provenant des coupes.



Piquage par découpe et pose de collerette : source d'inétanchéité à l'air et de pertes de charges.



Conduits terminaux souples étranglés par des colliers. Pertes de charges énormes. Utiliser des colliers plus larges, inutile de serrer autant !

- ✓ Privilégier chaque fois que c'est possible les **piquages et coudes à 45°**, qui génèrent moins de pertes de charges. Une attention particulière doit être accordée à l'antenne la plus défavorisée, qui impose sa perte de charge à tout le réseau. Ceci doit être discuté avec l'entreprise dès la réalisation des plans d'exécution, sur la base des plans DCE.

- ✗ **Proscrire les étranglements des réseaux terminaux souples.** Idéalement, les raccordements terminaux doivent être réalisés en conduits semi-rigides (avec correction acoustique si nécessaire).

Étanchéité à l'air des réseaux de ventilation

Les récentes campagnes de mesure d'Enertech ont mis en évidence l'importance énorme qu'a l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation : **sans étanchéité, rien ne fonctionne** :

- ✗ la modulation de débit des bouches (hygroréglables, volets motorisés,...) ne fonctionne pas car quand le débit diminue à la bouche, ce sont les fuites qui augmentent, et les ventilateurs extraient toujours le même débit ;
- ✗ les taux de fuite constatés peuvent prendre une proportion insoupçonnée (plus de 50% du débit de base sur certaines opérations, voir la suite p 180) : dans ce cas pour avoir le débit voulu aux bouches, il faut augmenter la pression au niveau du ventilateur, ce qui génère du bruit (bruit du moteur et vitesse d'air trop importante dans certaines parties du réseau), et une consommation électrique énorme (+50% de débit, c'est plus que doubler les consommations électriques, voir § 2.3.2).

C'est pourquoi le suivi de chantier doit être d'une vigilance extrême sur ce sujet :

- ✓ **Les assemblages classique (mastic, accessoires à joints classiques) ne suffisent pas.** Il faut impérativement recouvrir les assemblages par des **bandes de recouvrement avec colle butyl** (pas le simple adhésif alu qui ne tient pas bien dans le temps et qui est inadapté sur les conduits semi-rigides en accordéon).



Piquages réalisés avec pièces de transformation, et bande de recouvrement butyl : bonne étanchéité.

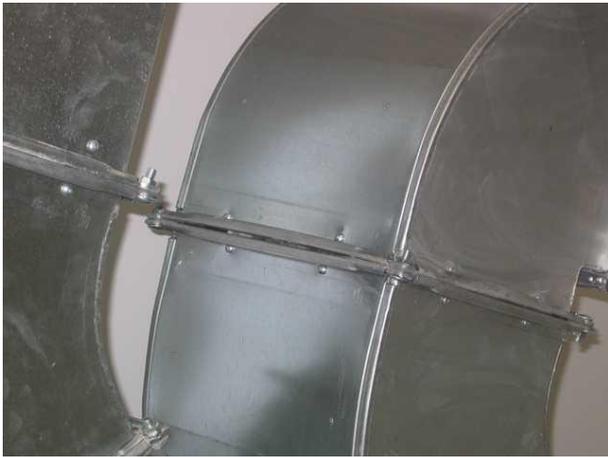


Conduit percé par la découpe du conduit voisin (hors AAP)



Caisson de piquage cabossé lors de la pose de la couverture (hors AAP).

- ✗ **De nombreuses fuites sont dues à des composants maltraités sur le chantier** : conduits cabossés, tés souches déformés, etc. Il est important que les composants soient stockés à l'abri des chocs (et de la poussière... les conduits doivent être livrés et stockés avec des bouchons), une mise en œuvre soignée et que les différents corps d'état respectent le travail des autres (photos ci-dessus)...
- ✗ Une attention particulière doit être apportée aux **réseaux rectangulaires** : bien s'assurer de la mise en œuvre conformément aux règles de l'art : mousse précomprimée dans l'assemblage, et mis en compression sur tout le pourtour par des éléments de serrage en nombre suffisant. Il existe également des solutions plus performantes avec des profils d'assemblage à joint intégrés.
- ✗ L'assemblage des conduits rectangulaires dans les angles laisse souvent des fuites : à traiter au mastic.



Fuite au niveau d'un réseau rectangulaire : il manque des éléments de serrage.



Fuite dans un angle d'un réseau rectangulaire.

- ✘ Les **manchettes souples** sont également des points faibles de l'étanchéité. En toiture, il est important de les protéger contre les intempéries et... les oiseaux (photo ci-dessous).
- ✓ Il existe à présent des gammes de manchettes souples à joints, plus étanches à l'air.
- ✘ Il convient de vérifier l'étanchéité du raccord des réseaux à la CTA (photo ci-dessous)...



Manchette souple percée (hors AAP)



Fuite au niveau du raccord sur la CTA.

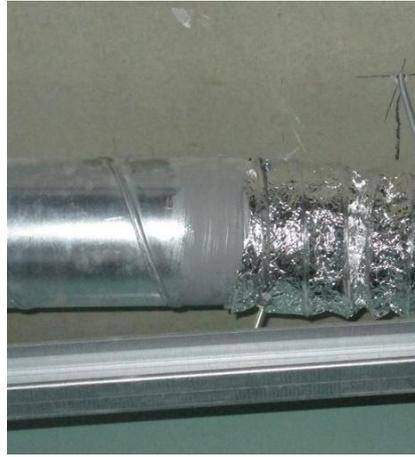


Fuite majeure au niveau d'un caisson de répartition : fixation insuffisante et adhésif qui se décolle (hors AAP)

- ✘ On voit encore sur les chantiers des défauts d'étanchéité à l'air majeurs, comme la photo ci-dessus. Cela peut être dû à une inattention de l'entreprise (en l'occurrence la fixation est insuffisante), ou à **l'intervention postérieure d'un autre corps d'état**, par exemple le plaquiste qui réalise le faux plafond. La Maîtrise d'œuvre doit veiller au bon phasage des travaux et à l'absence de tels défauts.
- ✘ A l'intérieur du bâtiment, on constate d'importantes fuites au niveau **des réseaux terminaux**. Il faut rappeler à ce sujet que les conduits souples phoniques sont la plupart du temps perforés au niveau de leur peau intérieure. C'est donc la peau extérieure qui fait l'étanchéité à l'air. Il faut donc veiller à ne pas la déchirer (or elle est souvent fragile), et c'est elle qu'il faut raccorder de façon étanche.
- ✓ Réaliser le raccordement des conduits souples avec un adhésif (durable, avec colle butyl) et non avec un simple collier.



Conduits isophoniques aluminisés : la peau intérieure étant perforée, c'est la peau extérieure qui fait l'étanchéité.



Liaison entre un conduit souple et un conduit rigide par un simple collier : non étanche. Il faut un adhésif butyl (hors AAP)



Conduit souple isophonique dont la peau extérieure a été enlevée : fuites très importantes !

- ✓ L'emploi de **conduits semi-rigides** permet de réduire le risque de fuites. En revanche, ils offrent peu (conduits semi rigides plastiques) ou pas (conduits métalliques) d'atténuation acoustique.
- ✓ La liaison sur conduits semi-rigide alu ou galvanisé doit être réalisé avec un adhésif présentant une forte épaisseur de colle (1mm), pour une fixation solide et étanche.

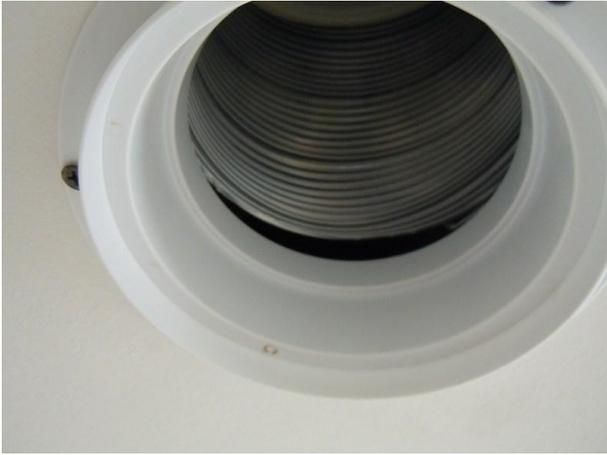


Raccord non étanche entre conduit semi-rigide et croix oblique : préconiser un adhésif avec forte épaisseur de colle (hors AAP)



Réseau semi-rigide plastique : assemblage par pièces à joint du fabricant. Bonne étanchéité.

- ✓ Il existe aujourd'hui plusieurs fournisseurs apportant une gamme complète de solutions pour les liaisons terminales étanches avec conduits semi-rigides PEHD.
- ✓ Assurer la **liaison entre les conduits terminaux et les bouches** : le conduit doit être raccordé sur la manchette par un assemblage du fabricant à joint ou un adhésif durable. La liaison entre la bouche elle-même et sa manchette doit être assuré par un système à joint.



Conduit terminal non raccordé sur le fût d'une bouche d'extraction.



Raccord non étanche entre le conduit et la manchette

✓ **Compte tenu de tout ce qui précède, il semble nécessaire de généraliser en France la pratique des tests d'infiltrométrie des réseaux de ventilation.**

- ✓ Ces tests sont d'ailleurs devenus obligatoires dans le cadre du label Effinergie + (RT2012 -20%, classe d'étanchéité visée : A).
- ✓ Comme pour les tests d'étanchéité à l'air du bâtiment, il est nécessaire de préciser dans les CCTP la classe d'étanchéité à l'air visée, et de faire réaliser un **test en cours de chantier**. En effet, le test final ne peut que constater des fuites, il est généralement impossible de faire des reprises à ce stade. Le test en cours de chantier est à réaliser avant de fermer les gaines techniques et les faux plafonds, de manière à pouvoir effectuer facilement les reprises nécessaires.

Retours des premiers tests d'infiltrométrie des réseaux réalisés dans le cadre des Appels à Projets

Sur ce sujet nouveau, la région Bourgogne s'est également montrée en avance **en pratiquant dès 2012 des tests d'infiltrométrie des réseaux de ventilation.**

Quelques photos prises par l'opérateur pendant les tests :



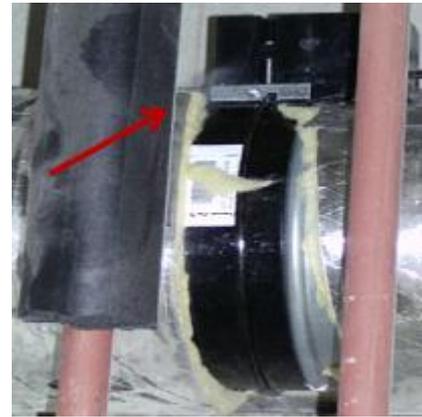
*Fuite importante au niveau d'un té souche
(photo : AFORDEX)*



*Fuite à la liaison entre conduit souple et conduit rigide
(photo : AFORDEX)*

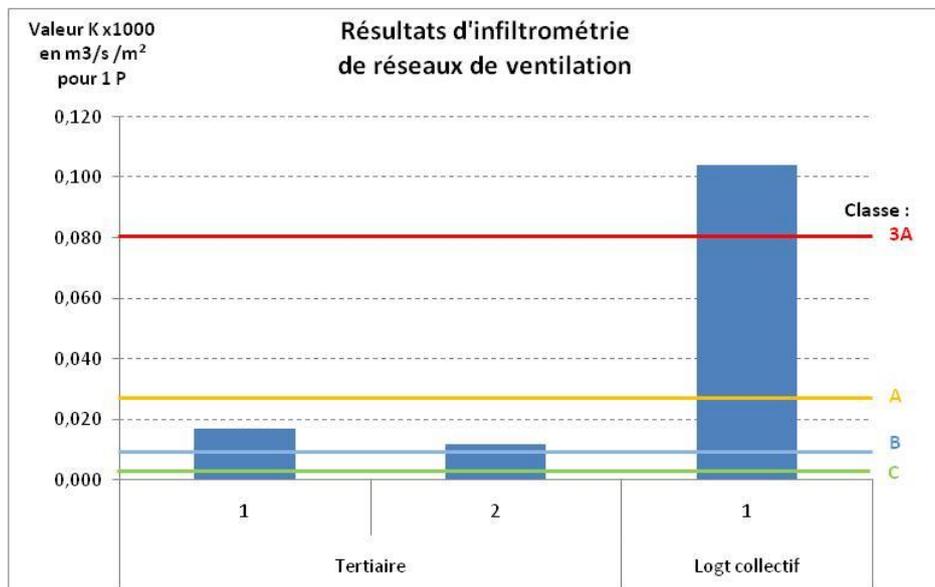


Fuite au niveau des piquages
(photo : AFORDEX)



Fuite au niveau des jonctions avec un registre
(photo : AFORDEX)

Les valeurs de perméabilités obtenues lors de ces premiers tests sont présentées dans le graphique suivant :



Résultats des 3 tests pratiqués à ce jour dans le cadre des Appels à Projet. Comparaison avec les classes d'étanchéité à l'air A, B et C.

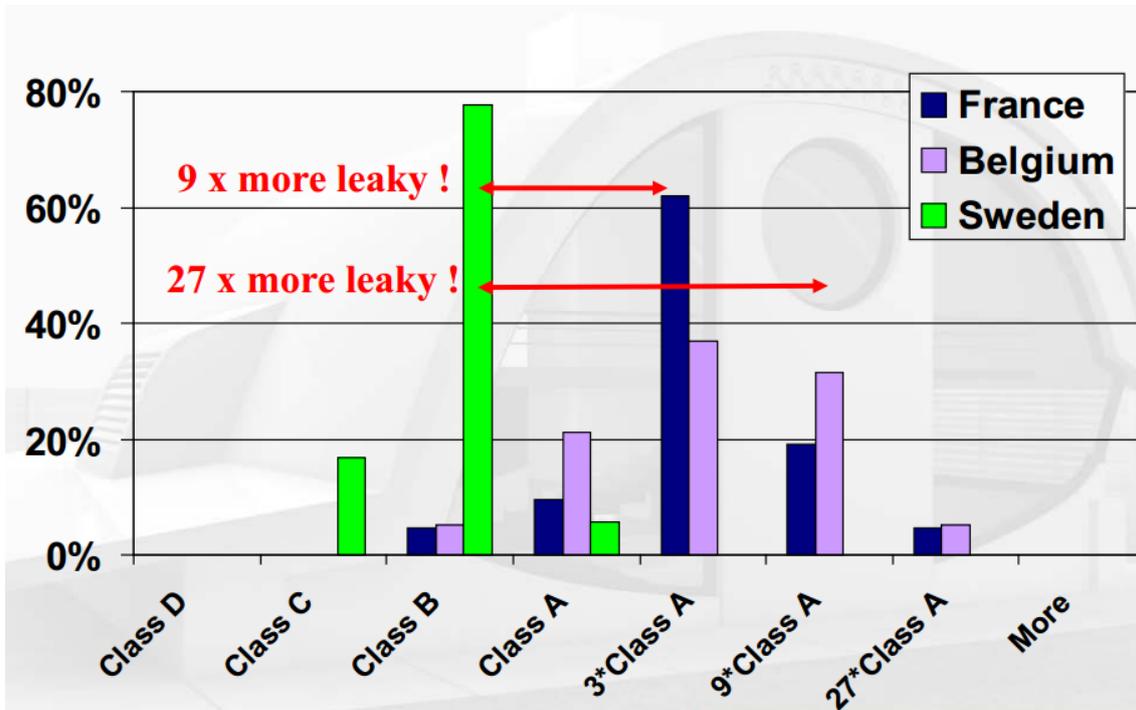
Sur les 3 tests réalisés, 2 sont en classe A, et le dernier est au delà de la classe « 3xA » (3 fois plus de fuites que la classe A. Pour se représenter l'importance de ces fuites, on peut calculer le taux de fuite à la pression d'utilisation normale du réseau :

Type	N°	Ventilation	Classe	Valeur K x 1000 m3/s /m² à 1 Pa	Testé à Pa	Pression d'usage Pa (hypothèse)	Taux de fuites
Tertiaire	1	Double flux	A	0,017	250	150	11%
	2	Double flux	A	0,012	250	150	6%
Logt collectif	1	Double flux	3A	0,104	160	120	58%

NB : comme indiqué dans la partie conception (§ 2.3.2), la relation entre la classe d'étanchéité et le taux de fuite dépend de la compacité du réseau. Ces ordres de grandeur ne sont donc pas extrapolables à d'autres opérations.

C'est un résultat très décevant, surtout pour le logement collectif et l'opération Tertiaire 1. L'opération tertiaire 2 a été testée sur un réseau assez compact et dont le débit nominal est important, d'où un taux de fuite assez faible.

Ces résultats reflètent malheureusement bien la mauvaise étanchéité à l'air des réseaux en France :



Répartition des résultats d'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation en France, Belgique et en Suède. En France, plus de 80% des réseaux sont de classe 3xA ou pire. A l'inverse, près de 80% des réseaux sont en classe B en Suède, et même plus de 15% sont en classe C. *Source : Save-Duct project 1999.*

On voit donc qu'il reste du chemin à parcourir avant que nos réseaux soient étanches à l'air. **Mais on voit également que cela est possible**, puisque c'est déjà le cas dans d'autres pays Européens (les pays scandinaves et le Danemark en particulier).

La diffusion d'air

- ✓ Veiller à l'orientation des bouches de soufflage à lamelles : celles-ci doivent souffler vers le haut et non sur les occupants.



Bouches de soufflage orientables : diriger le flux d'air vers le haut. (hors AAP)

- ✓ Attention aux bouches orientées vers le bas : configuration à éviter en conception. Sur le chantier, prévoir des bouches à ailettes diffusant l'air à l'horizontale.

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Suivi de la ventilation en phase chantier			
	A proscrire	Minimum	Optimal
CTA	CTA abimée à l'approvisionnement	Viser les performances décrites au CCTP	
Réseaux	<p>Piquages par découpe et pose de collerette.</p> <p>Cabosser les composants (conduits, té souches...)</p> <p>Réseaux dégradés par d'autres corps d'état</p>	<p>Choix des bons produits : réseaux rigides (éviter le rectangulaire si possible) et liaisons terminales en semi rigide (PEHD)</p> <p>Vérifier le bon dimensionnement des réseaux (enjeux : bruit, pertes de charges)</p> <p>Adhésif de recouvrement au butyl pour l'étanchéité à l'air.</p> <p>Raccords étanches du réseau terminal, jusqu'aux bouches : joints, adhésifs...</p>	<p>Réaliser un test d'infiltrométrie des réseaux de ventilation.</p> <p>Veiller à la propreté des réseaux (conduits stockés avec bouchons...)</p> <p>Veiller à la qualité de la diffusion de l'air.</p>

3.3.3 Chauffage

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET fluides	Viser les fiches produits avant commande. Suivi des calorifuges.

❖ Bonnes pratiques

Chaufferie

- ✓ **S'assurer du respect des préconisations du DCE** : rendement des chaudières, faible consommation électrique des pompes, présence des compteurs de chaleur (au bon endroit et avec sonde déportée positionnée correctement), etc.



Pompes de classe A, calorifuges complets, manomètres et thermomètres présents.



Purge d'air efficace.

- ✓ Prévoir des plots anti-vibratiles pour les pompes, ainsi qu'un kit manomètre pour la mesure de la hauteur manométrique.
- ✓ S'assurer que la **purge d'air** est efficace : elle ne doit pas être située sur une section droite mais dans un angle au droit d'une canalisation verticale. Purge à prévoir à la sortie des générateurs, sur les préparateurs ECS ainsi que sur les ballons de préchauffage solaire. En effet, chaque fois que de l'eau est chauffée, elle libère les gaz dissouts.
- ✓ Prévoir une vanne de chasse DN 50 mini pour la vidange d'une bouteille de découplage ou d'un pot à boue.
- ✗ Attention à la **pose des vannes trois voies** : positionnées à l'envers, elles ne pourront pas fonctionner correctement...
- ✓ Vérifier la position des **compteurs de chaleur** et des sondes associées, et la présence d'un filtre à tamis pour protéger les compteurs à hélice (privilégier les compteurs à ultrason pour éviter ce problème).
- ✓ Prévoir les **thermomètres** nécessaires au bon suivi de l'installation : départ et retour des circuits (dont le bouclage), partie haute, intermédiaire et basse des ballons, etc.
- ✓ S'assurer du **calorifuge complet** de toute l'installation, y compris tous les accessoires : échangeurs, corps de pompes, vannes d'équilibrage, etc. Aucune partie métallique ne doit rester visible, comme lorsqu'on réalise une installation d'eau glacée.
- ✓ Vérifier l'épaisseur de la **jaquette isolante des ballons** (10 cm mini), et le calorifuge du fond du ballon.

Réseaux de chauffage

- ✓ Aborder dès la réunion de lancement du chantier la **nature et l'épaisseur des calorifuges**. Demander la fiche technique pour valider la performance.
- ✓ Dès le début de la pose des conduits, vérifier qu'il y a la **place pour l'épaisseur de calorifuge** prévue, que les **colliers pré-isolés** sont mis en place le cas échéant, et que les réservations pour les traversées de mur et de dalles sont suffisantes.



Réseau en cours, avec coller isolant et réservation dans le mur suffisante pour le calo.



Continuité partielle de l'isolant à la traversée d'un refend (calorifuge moins bon qu'en partie courante.



Calorifuge en coquilles PIR, colliers isolants, et coquille adaptées pour les vannes.

- ✓ Veiller au respect de la nature et des épaisseurs des calorifuges.
- ✓ Vérifier la mise en œuvre des coquilles isolantes pour les vannes, des rehausses de levier pour les vannes si besoin, etc.
- ✓ S'assurer de la présence des vannes d'équilibrage (statiques ou dynamiques, selon la conception).
- ✓ Vérifier que les **tubes encastrés en dalle** sont bien pré-isolés, le cas échéant (cf § 2.3.3, p 101)
- ✗ L'équilibrage du réseau devient quasiment impossible une fois le bâtiment occupé : **faire réaliser l'équilibrage impérativement avant la réception.**

Emission et régulation terminale

- ✓ Calcul des émetteurs : il est soit réalisé par le bureau d'étude, s'il a la mission EXE, soit par l'entreprise sur la base du calcul de déperditions. Bien prendre en compte le régime de température prévu au CCTP (à puissance égale, un radiateur au régime 50/40 devra être 2,5 fois plus gros qu'un radiateur au régime 80/60).
- ✓ Viser les caractéristiques de la **régulation terminale** : précision (différentiel d'enclenchement) du thermostat, programmable ou non, bridé ou non, etc.
- ✓ Vérifier la nature des actionneurs (normalement ouvert ou normalement fermé), et la cohérence avec le raccordement sur le bornier des thermostats.
- ✗ Tester le bon raccordement entre les thermostats et les actionneurs qui leur correspondent : il est très facile d'inverser deux locaux ou deux logements, si le câblage entre le thermostat et l'actionneur (souvent réalisé par l'électricien et non le chauffagiste) n'a pas été repéré correctement.



Nourrices alimentant des radiateurs : les pièces desservies sont repérées au niveau hydraulique d'une part, et les fils reliés aux thermostats sont également repérés d'autre part, ce qui réduit le risque d'erreur.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Suivi du lot chauffage en phase chantier			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Chaufferie	Ballon peu isolés (moins que 100mm). Absence de purge efficace.	Viser les performances des équipements. Calorifuge complet de tous les organes.	
Réseaux	Absence d'isolant à la traversée des dalles et des murs.	Respect des performances des calorifuges, colliers pré-isolés, etc.	Tubes pré-isolés en dalle
Emission et régulation		Viser la performance des thermostats	Thermostats bridés.

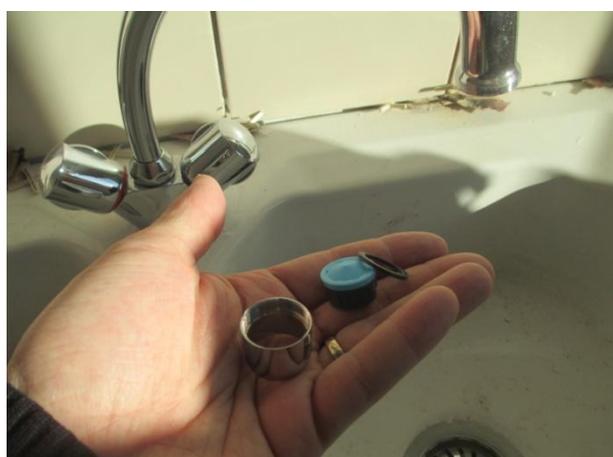
3.3.4 Plomberie et ECS

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET fluides	Suivre la pose des équipements hydro-économiques, Viser les générateurs et les calorifuges (bouclage).

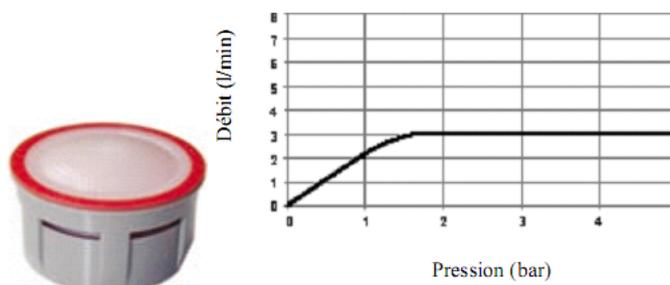
❖ Bonnes pratiques

Equipements sanitaires

- ✓ Vérifier la présence des **équipements hydro-économiques** préconisés :
 - Douchette économe (par exemple à 6 l/min), Limiteurs de débit autorégulés (demander la fiche technique pour vérifier qu'ils sont bien autorégulés !) selon les préconisations par usage (par exemple 6 l/min en cuisine, 4,5 l/min en salle de bain et 2,5 l/min pour les lave main).
- ✓ Le cas échéant, vérifier le classement C3 des mitigeurs (eau froide au centre).



Vérification du limiteur de débit : c'est un simple mousseur (hors AAP).



Exemple de limiteur de débit autorégulé et de courbe de débit en fonction de la pression (autorégulé à 3 l/min)

- ✓ Vérifier les débits réellement atteints avec un verre de mesure, ou en chronométrant le remplissage d'un récipient de volume connu.



Verre de mesure du débit : le niveau de l'eau permet de lire le débit.



Alimentation EF et ECS pour le lave vaisselle, l'ECS est repérée par un point rouge (hors AAP)

- ✓ S'assurer de la réalisation de la **double alimentation ECS-EF des lave-vaisselle**, le cas échéant. Afin de permettre aux habitants de s'y retrouver, prévoir un point rouge pour identifier l'ECS.

Génération d'ECS

- ✓ Viser la **performance des équipements** sur fiche technique avant la commande : rendement de génération, niveau d'isolation des ballons (pertes de stockage, constante de refroidissement), consommation des auxiliaires, etc.
- ✓ Dans le cas d'une **installation solaire**, valider toute variante par un calcul de production solaire avec les mêmes hypothèses de puisage qu'au DCE. 1m² de capteur solaire n'a évidemment pas la même productivité d'un fabricant à l'autre !



Isolation d'un ballon ECS par 10 cm d'isolant performant. Vérifier aussi le dessus et le dessous !



Mitigeur thermostatique, et tronçons non isolés.

- ✓ Vérifier l'isolation des ballons (viser 10 cm), la purge efficace en sortie des préparateurs et ballons solaires, la performance de la pompe de bouclage, le **calorifuge complet de tous les organes**, etc.
- ✓ Suivre la **nature des mitigeurs et leur raccordement** y compris au retour de bouclage (cf § 2.3.4), ainsi que la présence et le sens de pose des clapets anti-retour.
- ✓ Pour les **installations solaires**, vérifier l'isolation de la boucle solaire, la performance des pompes, le calorifuge des échangeurs, etc.
- ✓ Vérifier également la pression de prégonflage du **vase d'expansion solaire** : si le circuit primaire est de grande hauteur, la pression de prégonflage doit être adaptée, sinon le volume d'expansion réel sera réduit et l'installation risque de dégazer à la moindre surchauffe. Outil de dimensionnement de ce vase : http://ines.solaire.free.fr/vesth/Calcul_vase_d_expansion.htm
- ✓ Vérifier la pose correcte des **compteurs de chaleur**, ainsi que la sonde de température déportée.

Distribution, bouclage

- ✓ Valider les fiches techniques des **calorifuges** avant commande, y compris les **colliers isolants**.
- ✓ Vérifier la taille des réservations, pour assurer la continuité de l'isolant.
- ✓ Suivre les diamètres, les épaisseurs de calorifuges et l'isolation de tous les organes.
- ✓ S'assurer de la présence des organes d'équilibrages (statiques ou dynamiques), ainsi que leur réglage.

Distribution terminale

- ✓ La cas échéant, valider la fiche technique des conduits pré-isolés à incorporer en dalle (avant incorporation...).

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Suivi du lot ECS en phase chantier			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Equipements sanitaires		Limiteurs de débit autorégulés. Douchette économes.	Mitigeurs classés C3 (position froid au milieu).
Génération d'ECS	Ballon peu isolés (moins que 100mm). Absence de purge efficace.	Viser les performances des équipements. Calorifuge complet de tous les organes.	Viser les composants de l'installation solaire.
Distribution	Absence d'isolant à la traversée des dalles et des murs.	Viser la performance des calorifuges, y compris les colliers pré-isolés.	Tubes pré-isolés en dalle.

3.3.5 Electricité spécifique

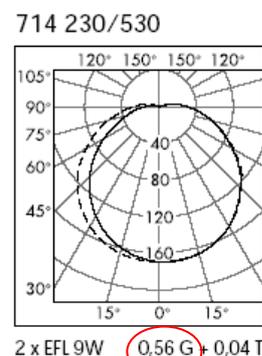
Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET fluides	Viser les fiches produits des luminaires et BAES avant commande.

❖ Bonnes pratiques

Eclairage

- ✓ Viser les **fiches produits des luminaires** avant commande : vérifier la performance des sources, de ballast, ainsi que le rendement optique.

Ci-contre : exemple de diagramme d'émission de lumière. Ce luminaire a un rendement optique utile de 56% (entouré en rouge), ce qui n'est pas bon.



- ✓ Vérifier la mise en œuvre des commandes souhaitées (détection de présence, capteur de luminosité, commande distincte entre zone à fort éclairage naturel et zones éloignées des menuiseries dans une même salle, etc.).
- ✓ S'assurer du **bon positionnement des détecteurs** (suis-je bien détecté dans toute la zone sensée être couverte ?), ainsi que le respect du zonage souhaité (multiplier les zones dans les parkings, pour éviter l'allumage complet systématique).
- ✗ A l'inverse, attention aux détecteurs qui peuvent « voir » à travers les portes (détecteurs HF). Veiller à ce que dans la pratique on ne risque pas d'allumage inutile.
- ✓ Viser la référence des **BAES / BAEH**, et leur consommation de veille (qui dit être inférieure à 1 W).

Electricité spécifique des logements

- ✓ Suivre la mise en œuvre des solutions préconisées : prises commandées, fourniture de LBC, etc. (voir § 2.3.5, p 117)

Bureautique

- ✓ Suivre la réalisation des mesures préconisées : réseau « vert » pour la coupure des veilles, ou bien coupure de toutes les prises de courant du bâtiment par un asservissement à l'alarme anti intrusion à l'exception d'une prise par pièce clairement identifiée... (voir § 2.3.5, p 119)

Ascenseur

- ✓ Viser le type d'ascenseur et sa performance énergétique. Bien prendre en considération la **puissance en veille de l'armoire de commande**.
- ✓ Vérifier que l'**éclairage de la cabine est asservi à la présence**, et que l'**éclairage de la gaine d'ascenseur est également asservi**. (par exemple : éclairage simple allumage lorsque la protection travailleur est activé et allumage temporisé 30 min en fonctionnement normal)

❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Suivi des lots Electricité et Ascenseur en phase chantier			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Electricité	Eclairage permanent, surtout du sous sol.	Viser la performance des luminaires. Vérifier la nature des commandes d'éclairage. Suivre la réalisation des mesures d'économies prévues au CCTP (dans les logements, sur la bureautique...)	BAES à basse consommation. Zonage des grands locaux selon apports naturels.
Ascenseur	Eclairage gaine non asservi.	Asservir l'éclairage de la cabine sur la présence.	Viser la consommation de veille de l'armoire de commande.

3.4 Mise au point des installations techniques

On a eu par le passé souvent tendance à croire qu'il suffit de mettre en place des équipements performants pour qu'un bâtiment soit peu consommateur d'énergie. Mais, pour peu qu'on se pose la question, on voit vite que c'est faux. **Un équipement performant mais mal réglé va non seulement consommer beaucoup plus que prévu, mais il peut aussi générer des dysfonctionnements**, comme du bruit dans les réseaux de ventilation, l'absence de variation de débit, des défauts d'équilibrage ou encore des surchauffes.

Les retours d'expériences présentés dans ce chapitre sont issus des visites de Mise au Point réalisées à partir de 2012 dans le cadre des Appels à Projets, ainsi que des retours de campagnes de mesure.

3.4.1 Généralités – qui fait quoi ?

Dans l'idéal, chacun des acteurs de la réalisation des installations techniques communique aux autres les éléments dont ils ont besoin :

- ✓ le BE définit les **séquences de régulation** (dans son CCTP) ;
- ✓ le BE assure le VISA des **fiches techniques** proposées par l'entreprise ;
- ✓ l'entreprise ou le BE réalise la mission d'exécution, dont l'**analyse fonctionnelle**, qui traduit concrètement en matériel et en logique de programmation les séquences de régulation ;
- ✓ l'entreprise réalise les travaux, puis **effectue les réglages** selon les valeurs théoriques calculées en EXE ;
- ✓ le BE **vérifie les séquences de régulation** à la Réception (« réception fonctionnelle », avec mesures instantanées), et participe avec l'entreprise à l'**optimisation des points de consigne** (passer des valeurs théoriques aux valeurs optimales calées sur le fonctionnement réel du bâtiment) ;
- ✓ l'entreprise et le BE transmettent la connaissance de l'installation aux utilisateurs et à l'entreprise de maintenance via les **DOE et DUEM**. Les points de consignes optimisés sont consignés dans ces documents, ainsi que dans les locaux techniques.

Ce schéma idéal est rarement intégralement respecté actuellement. Le plus souvent les réglages ne sont pas effectués, et la maîtrise d'œuvre se contente de réceptionner le matériel. Le réglage est laissé à l'entreprise de maintenance, qui ne dispose même pas des séquences de régulation souhaitées...

3.4.2 Chauffage

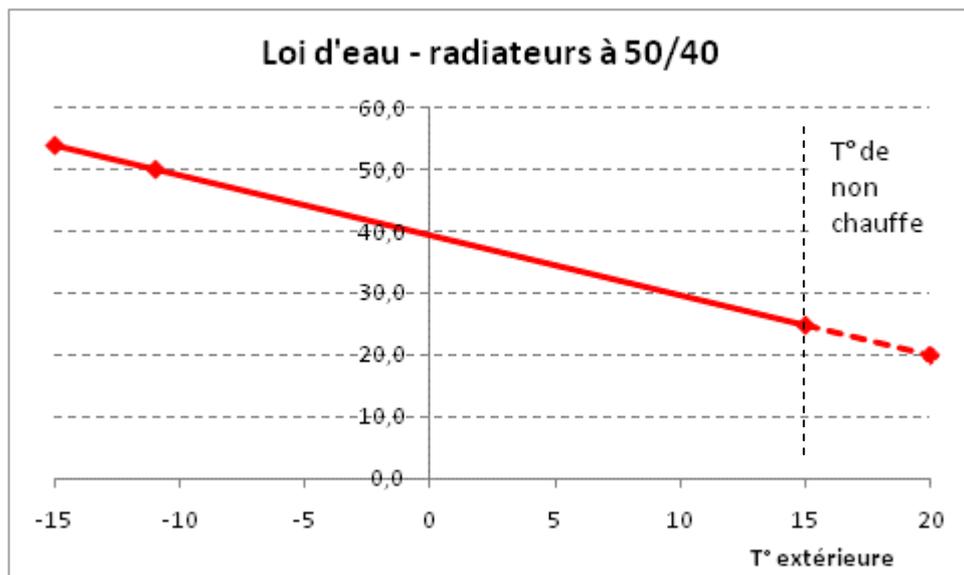
Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET et entreprise	Régler les lois d'eau, la bascule été-hiver, optimiser le point de fonctionnement des pompes.

❖ Bonnes pratiques

Programmation des générateurs et régulateurs

- ✓ **Régler la loi d'eau** : la valeur de dimensionnement des émetteurs (régime de température nominal) est réglée pour la température extérieure de base. L'autre point de la courbe est plus délicat (et rarement précisé dans les CCTP) : pour les bâtiments à basse consommation on peut fixer un point

neutre à 20°C au départ pour 20°C extérieur. Pour les batteries et plafonds rayonnants, on pourra placer le point neutre à 25°C pour 20°C extérieur.



Exemple de loi d'eau

- ✓ Régler également la **loi d'eau du générateur**, sur le maximum des lois d'eau au départ des circuits. La température constante pour la production d'ECS est à programmer par ailleurs (avec une priorité totale ou partielle).
- ✓ Régler la **température de non chauffe** : pour les bâtiments à basse consommation on peut arrêter les générateurs et les pompes dès 15°C extérieur pendant 24h glissantes.
- ✓ Programmer les **plages de fonctionnement**, et les **ralentis** éventuels. Pour les bâtiments à basse consommation, on constate en pratique que la température chute très peu pendant la nuit. L'intérêt du ralenti est donc quasiment nul en logement. Par contre il impose une surpuissance à la relance, qui peut être pénalisante (dégradation du rendement pour fournir de l'eau plus chaude). C'est pourquoi il est recommandé de ne plus réaliser de ralenti de nuit.
- ✓ Pour les bâtiments tertiaires, il reste intéressant de programmer un ralenti pendant les week-ends et les vacances. Prévoir de relancer avant l'occupation. On peut prévoir une augmentation de la loi d'eau à la relance (sauf pour les PAC, où on dégraderait trop le COP), pour accélérer la remontée en température du bâtiment.

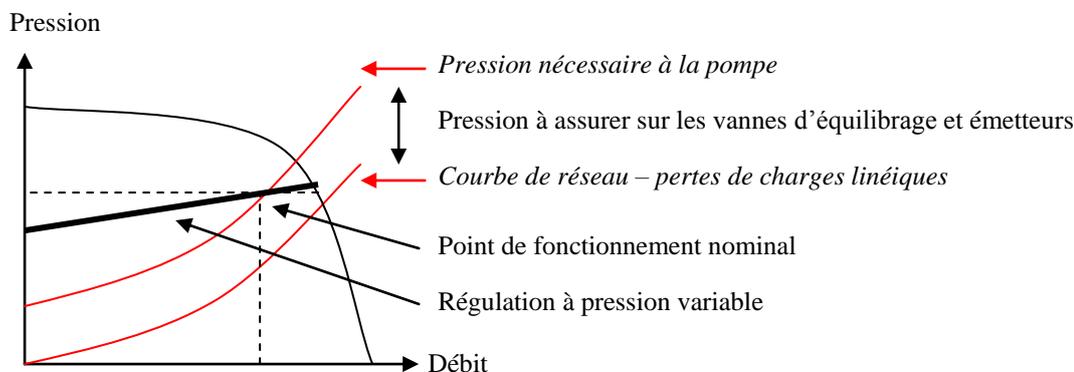
Réglage des pompes

- ✓ Avant de pouvoir régler les pompes il faut impérativement avoir réalisé l'**équilibre hydraulique** de l'installation.
- ✓ Choisir le **mode de régulation** : à débit constant, à pression constante, à pression variable, sur consigne de différence de température entre aller et retour, etc.

Type de pompe	Mode de régulation possible
Circuit chauffage	Le débit varie avec la régulation terminale : pompe réglée pression constante ou pression variable.
Circuit primaire	Pour les générateurs à puissance variable ou réseaux de chaleurs : étudier une régulation à écart de température aller/retour constante. Un générateur à puissance variable peut également piloter son circulateur par commande 0-10V.
Circuit production ECS, pompe de Bouclage	Le débit n'est pas amené à varier : réglage à débit constant.

Modes de régulation des pompes en fonction de leur usage. NB : ce tableau présente des généralités qui peuvent s'avérer inadaptées à des opérations particulières.

- ✓ Pour la régulation à débit constant, régler la valeur du débit. Si une vanne d'équilibrage est prévue sur le circuit, celle-ci ne doit servir qu'à vérifier le débit, et rester grande ouverte.
- ✓ Pour la régulation à pression constante, la **détermination du point de consigne** nécessite un petit protocole adapté à la configuration :
 - Dans tous les cas, la régulation terminale doit être ouverte. En phase travaux, démonter toutes les têtes électrothermiques (en les numérotant au préalable) et/ou les robinets thermostatiques. Après réception (ce qui n'est jamais souhaitable) on peut augmenter temporairement la consigne sur le thermostat de chacune des pièces. S'il est difficile d'accéder à tous les locaux, on effectuera le réglage au plus froid de l'hiver, ou bien on peut provoquer la demande en abaissant fortement la loi d'eau un jour avant (prévenir les utilisateurs !).
 - Partir de la valeur la plus faible, et augmenter progressivement la consigne de pression :
 - Pour un circuit équilibré de façon statique, on augmentera la consigne jusqu'à obtenir le débit voulu (calcul d'EXE), en utilisant pour mesurer le débit soit le compteur de chaleur, soit une vanne d'équilibrage avec prise de pression.
 - Pour un circuit équilibré avec des vannes dynamiques à débit constant, on augmentera jusqu'à obtention de la pression nécessaire (selon documentation technique) aux bornes de la vanne la plus défavorisée.
 - Remettre en place la régulation terminale et régler les consignes voulues sur les thermostats.
- ✓ La **régulation à pression variable** s'effectue de la même manière. L'avantage est que la consigne de pression est automatiquement abaissée avec le débit, pour tenir compte de la diminution des pertes de charges linéiques du réseau. La pression est conservée aux organes d'équilibrage et aux émetteurs :



Principe de la régulation à pression variable.

Ce mode de régulation permet, à la marge, des économies d'électricité supplémentaires.

- ✗ On rappelle qu'il est inutile d'effectuer un réglage à débit variable sur un circuit dont le débit ne varie pas (production ECS, batterie réglée par une vanne trois voies en décharge inverse...).
- ✓ Le réglage des pompes est également à réaliser pour les **circuits de capteurs géothermiques**. On s'assurera que le débit calculé n'est pas trop important en vérifiant la différence de température entre aller et retour. Si celui-ci est toujours nettement inférieur à 5°C (ce qui arrive souvent), il faut diminuer le débit.
- ✓ Vérifier l'**asservissement des circulateurs** : pompes de circuit géothermique et pompes de charges asservies au fonctionnement du générateur associé, extinction de toutes les pompes au-dessus de la température de non chauffe.

Réglage de la régulation terminale

On se souvient que +1°C de consigne de chauffage provoque une augmentation du besoin de chauffage de +15% à +20% pour des bâtiments au niveau BBC, et de +18% à +25% pour des bâtiments Passifs. **L'absence de réglage, voire de bridage, de la consigne de température peut facilement faire augmenter de 50% la consommation de chauffage**, comme cela a été de nombreuses fois observé.

Par ailleurs, la réglementation (Code de la Construction) impose une température de 19°C au maximum.

On sait également que la **température ressentie** ne dépend pas que de la température de l'air, mais aussi de la température rayonnée par les parois, ainsi que par la vitesse de l'air ou encore l'hygrométrie. Dans les bâtiments à basse consommation la suppression des points froids et des courants d'air de l'inétanchéité à l'air permettent donc d'atteindre le même confort que dans un bâtiment peu isolé avec une température d'air plus faible.

Cependant, la question de la consigne de température est souvent abordée de façon irrationnelle, **le jugement sur le confort étant plus basé sur l'observation d'un thermomètre que réellement sur le ressenti** (la bonne question n'est pas « est-ce qu'il fait 24°C ? » mais « est-ce que je me sens bien ? »).

Si l'on peut concevoir, notamment dans les lieux de travail assis (bureaux...) que 19°C n'est pas suffisant pour tout le monde, en revanche les dérives parfois constatées jusqu'à 23 ou 24°C ne sont pas cohérentes avec une démarche de basse consommation, dans un contexte d'urgence climatique et de fin des énergies peu chères.

C'est pourquoi **les consignes convenues avec le Maître d'ouvrage, et le bridage le cas échéant** doivent être réalisés avant la réception et **contrôlés par la Maîtrise d'œuvre**. Un travail d'**information et de sensibilisation** doit être réalisé en concertation avec le Maître d'ouvrage pour expliquer ce qui précède.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Mise au point du chauffage			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Chauffage	Absence d'équilibrage et de réglage. Température non maîtrisée.	Régler les lois d'eau et la programmation. Régler les consignes des pompes.	Brider les thermostats.

3.4.3 Eau Chaude Sanitaire, installation solaire

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET et entreprise	Régler les consignes de température. Vérifier la logique de régulation du solaire.

❖ Bonnes pratiques

Eau chaude sanitaire

- ✓ Régler la **consigne du générateur d'ECS**. Le départ doit être réglé à 55°C, donc le haut du ballon ECS peut être réglé à 55°C (et non à 60°C comme c'est souvent fait), ce qu'autorise tout à fait la réglementation sur la légionnelle.
- ✓ Régler la **consigne du mitigeur ECS** à 55°C.
- ✓ Régler la vitesse de la **pompe de bouclage** de façon à assurer un retour à 50°C. Il n'est pas systématiquement nécessaire qu'elle soit à vitesse maximale... (sachant que sa consommation n'est pas anodine, puisqu'elle va fonctionner 24h/24, soit 8760 heures par an).

Installation solaire

- ✗ Avant tout, vérifier le **fonctionnement hydraulique** de l'installation. Certaines ne fonctionnent pas à cause d'une simple vanne fermée ! Ou encore d'un jeu de vannes de by-pass de la production solaire laissé ouvert, ne permettant pas la circulation d'eau dans les ballons solaires... Les causes de dysfonctionnement potentielles sont nombreuses, et leur nombre croît encore avec la complexité de l'installation (si on rajoute la décharge du ballon solaire dans le préparateur, etc...).
- ✓ Programmer et **tester la logique de régulation** : différentiel d'enclenchement, différentiel d'arrêt, etc.



- ✓ **Régler les pompes** : bien souvent elles sont laissées en vitesse maximale alors que c'est inutile. Les kits solaires incluent souvent un débit-mètre à flotteur, qui permet facilement de vérifier si l'on est au débit voulu.

Kit de régulation solaire de maison individuelle, avec débit-mètre à flotteur (cercle rouge) permettant de régler la pompe. En l'occurrence la vitesse 1 était suffisante.

- ✓ **Asservir toutes les pompes** : en particulier dans le cas d'un échangeur à plaque sur le circuit solaire, la pompe secondaire peut tout à fait être asservie au fonctionnement de la pompe primaire.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Mise au point ECS			
	A proscrire	Minimum	Optimal
ECS	Pompes non asservies, ou non réglées	Régler les consignes et logiques de régulation.	
Installation solaire		Vérifier le fonctionnement hydraulique et la régulation.	

3.4.4 Ventilation

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET et entreprise	Programmer les plages d'utilisation. Régler la consigne des ventilateurs.

❖ Bonnes pratiques

Programmation horaire

En tertiaire, l'essentiel du potentiel d'économie d'énergie sur la ventilation réside dans le simple fait d'**arrêter la ventilation lorsqu'elle est inutile !**

- ✓ Programmer le fonctionnement de la ventilation sur horloge (interne ou externe). Prévoir la remise en route avant l'utilisation, pour renouveler le volume d'air (1h avant si le débit correspond à 1 vol/h, 30 min avant si le débit représente 2 vol/h).
- ✗ En présence de volets sur les CTA (pour empêcher le gel des batteries notamment), vérifier l'asservissement de ces volets à l'allumage et à l'extinction de la CTA (on a vu des CTA fonctionner sur volet fermé...).

Réglage des ventilateurs

- ✗ Pour les CTA en triphasé, vérifier le **sens de rotation des ventilateurs**. Un ventilateur tournant à l'envers aura beaucoup de mal à atteindre la pression souhaitée (c'est généralement ainsi qu'on s'aperçoit du problème).
- ✓ Chaque fois que le débit est amené à varier (bi-débit en cuisine, ventilation hygroréglable, registres motorisés...), les ventilateurs doivent être **réglés à pression constante**.
- ✓ Il est généralement préférable de réguler sur une consigne de pression sur la reprise plutôt que sur le soufflage, car en logement l'organe qui crée la variation de débit (la bouche bi-débit) est sur la reprise. Ce circuit est également moins sujet à l'encrassement des filtres, ce qui rend cette mesure de pression plus fiable.
- ✓ Pour déterminer la consigne de pression de l'installation, une procédure de réglage est nécessaire :

Proposition de procédure de réglage à pression constante :

- ✓ *Mise en service de la CTA (régulation à pression constante sur la reprise, paramétrage du by-pass automatique en été, du dégivrage, des alarmes encrassement des filtres...) + paramétrage du système SSI. Tous les iris d'équilibrage ouverts.*
- ✓ *Point de consigne en pression : partir d'une valeur basse, par exemple 100 Pa.*
- ✓ *Activer le grand débit dans tout ou partie des locaux concernés : théoriquement il faudrait donner à la CTA la capacité d'assurer le grand débit partout. Mais en pratique on peut prendre en compte un taux de foisonnement selon la taille de l'opération.*
- ✓ *Mesurer le débit à la bouche de reprise la plus défavorisée (la plus éloignée de la CTA), le grand débit étant activé. Cette mesure peut se faire soit directement avec un cône de mesure, soit par mesure de pression aux bornes de bouches autorégulées (selon la documentation du fabricant : généralement 50 à 70 Pa pour les bouches courantes).*
- ✓ *Augmenter progressivement la consigne de pression jusqu'à obtenir le débit voulu à la bouche de reprise la plus défavorisée.*
- ✓ *Équilibrer alors le débit de soufflage en jouant sur le coefficient paramétrable qui permet de*

corriger le soufflage par rapport à l'extraction (réglage en consigne de vitesse ou par mesure de débit selon les modèles). Vérifier le débit à la bouche de soufflage la plus défavorisée.

- ✓ *Vérifier que la bouche la plus favorisée (la plus proche de la CTA) n'est pas en sur-débit (< 150 Pa, pas de bruit généré). Si besoin, réduire la pression sur les branches les plus courtes avec les iris de réglage.*

NB : dans le cas de la ventilation hygroréglable, la mesure de débit à la bouche n'est pas possible (il faudrait connaître l'hygrométrie pour savoir quel est le débit souhaité. Assurer la pression voulue à la bouche la plus défavorisée.

Vérification du débit au cône de mesure.

- ✓ Lorsque le débit de ventilation ne varie pas, régler les ventilateurs à débit constant. Attention cependant à bien prendre en compte le taux de fuite. Celui-ci n'étant généralement pas connu, une procédure de mise au point est également nécessaire : on peut procéder comme indiqué dans l'encadré précédent, en ajustant le débit au ventilateur pour arriver au débit voulu à la bouche la plus défavorisée.



NB : comme on le voit, contrairement à l'équilibrage hydraulique, l'équilibrage du réseau de ventilation n'est pas nécessairement à réaliser avant le réglage de la consigne. Au contraire, il sera plus facile de régler les iris en fonction de la pression aux bouches des différentes branches après réglage de la consigne de la CTA sur la branche la plus défavorisée.

Régulation du dégivrage

- ✓ Programmer **la logique de dégivrage la moins consommatrice** : proscrire le dégivrage par batterie électrique. Pour les CTA à plaques, choisir la logique de dégivrage par arrêt du ventilateur de soufflage.
- ✓ On rappelle que les CTA à roue ne craignent pas le phénomène de givrage.

Régulation des batteries hydrauliques

La régulation des batteries est souvent très mal réalisée :

- * Contrairement à ce qui est généralement fait, **les batteries ne nécessitent pas un circuit à température constante**. On peut (et on doit, pour améliorer le rendement des générateurs et réduire les pertes du réseau !) prévoir une loi d'eau, pour faire varier la puissance (la température de départ) en fonction du besoin (la température extérieure).
- * La régulation généralement appliquée est une **consigne de température de soufflage**. Cette régulation entraîne une consommation d'énergie permanente, que la température dans les locaux soit inférieure ou supérieure à la consigne. **On chauffe tout le temps !** C'est évidemment une consommation d'énergie très importante.

Or, comme cela a été vu plus tôt (§ 2.3.2), l'inconfort lié au soufflage ne dépend pas beaucoup de la température de soufflage, mais surtout de la vitesse d'air. C'est donc une bonne diffusion d'air qu'il faut avant tout, et le préchauffage gratuit par l'échangeur double flux suffira à apporter bien plus de confort qu'en ventilation simple flux. C'est donc une consommation d'énergie importante et la plupart du temps inutile.

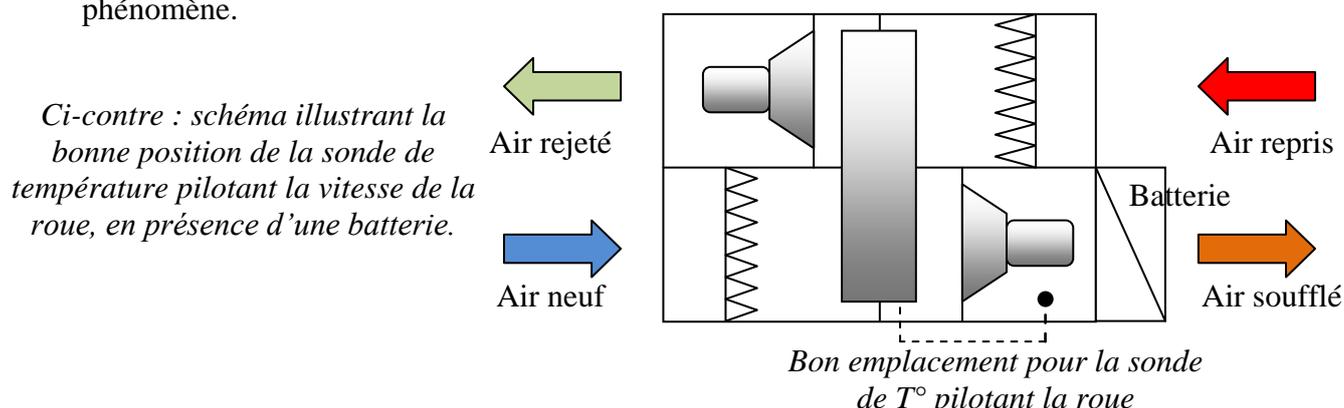


Batterie de préchauffage sur l'air de compensation pour une cuisine pédagogique (avant calorifuge...).

✓ Si un préchauffage de l'air est nécessaire (sur la compensation des hottes de cuisine collective par exemple), on pourra la réguler non sur une consigne d'air soufflé, **mais sur une consigne d'air repris**. Ainsi, dès que la température de la cuisine dépasse la consigne fixée, on arrête de préchauffer l'air (hors récupération de chaleur, le cas échéant). Les cuisiniers seront plutôt contents que l'air soufflé refroidisse la cuisine qui surchauffe, plutôt que la batterie contribue à accentuer encore la surchauffe...

- ✗ **Attention au risque de thermosiphon** entre la chaufferie et une batterie. En été, l'installation peut rester chaude (pour la génération ECS typiquement), et provoquer un thermosiphon avec une batterie en toiture. Bien prévoir une vanne d'arrêt, qui sera fermée au passage en mode été.
- ✗ Attention également à la logique de **régulation de la vitesse des récupérateurs à roue** en présence d'une batterie. Sans batterie, pour maximiser la récupération de chaleur, on donne une consigne assez élevée sur l'air soufflé, par exemple 24°C. Ce n'est qu'à partir de 24°C que la roue ralentit (système de by-pass pour l'été).

En revanche, en présence d'une batterie, attention à la position de la sonde par rapport à la batterie : pour appliquer cette même logique, il faut que la sonde soit placée entre la roue et la batterie. Si la sonde est après, il y a interférence entre la régulation de la batterie et celle de la roue qui résulte parfois dans l'arrêt de la roue au profit du fonctionnement de la batterie, ce qui n'est évidemment pas souhaitable. Déplacer la sonde si possible, sinon adapter les consignes pour éviter ce phénomène.



❖ *Synthèse des bonnes pratiques*

Synthèse – Mise au point de la ventilation			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Ventilation	Ventilateurs réglés à pleine vitesse. Moteur triphasé tournant à l'envers.	Procédure de réglage des consignes de débit ou de pression. En tertiaire, programmation horaire (CTA éteinte hors occupation)	

3.4.5 Installations électriques

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Chantier	BET et entreprise	Régler la temporisation des détecteurs et le seuil de luminosité.

❖ Bonnes pratiques

Réglage des dispositifs de commande

- ✓ **Régler la temporisation des détecteurs.** On rappelle que cette temporisation débute à la sortie des utilisateurs du champ de détection. On rappelle aussi qu'il vaut mieux en termes de performances une simple minuterie de courte durée qu'une détection de présence mal réglée. C'est pourquoi la durée de temporisation doit être réglée à une valeur basse, de 5 secondes à 20 secondes selon usage.
- ✓ Régler le **seuil de luminosité** au-dessus duquel l'allumage automatique n'est pas activé. On rappelle que cette disposition est rendue obligatoire par la réglementation thermique (RT 2012, article 27 pour les parties communes des bâtiments de logements, et article 39 pour le tertiaire) pour tout local ayant accès à de l'éclairage naturel. Malheureusement, le seuil n'est pas toujours réglé, ainsi l'éclairage artificiel peut s'allumer automatiquement alors que l'éclairage naturel aurait été suffisant.
- ✓ Dans le cas où de la gradation a été mise en œuvre, vérifier l'éclairement réel obtenu et ajuster les consignes. Utiliser pour cela un luxmètre.

Ascenseurs

- ✓ S'assurer du réglage de l'asservissement pour l'éclairage de la cabine, ainsi que pour l'éclairage de la gaine.

Réglage des sous-compteurs

- ✓ Les sous compteurs permettent parfois un facteur multiplicatif à l'affichage de l'index. Le cas échéant, noter clairement le calibre retenu (sur le schéma de l'armoire électrique, voire directement sur le sous-compteur) pour permettre au gestionnaire de s'y retrouver lors de ses relevés.
- ✓ Vérifier l'adéquation du choix du poids des impulsions avec l'usage. S'assurer que le poids d'impulsion choisi est bien pris en compte par le système de relève. Préférer le report d'index en mode bus chaque fois que c'est possible.
- ✗ Attention aux compteurs triphasés : il existe parfois plusieurs modèles de tore ampère-métrique pour un même sous-compteur : il faut alors régler le sous-compteur en adéquation avec le tore utilisé, sinon le comptage sera faux.

❖ Synthèse des bonnes pratiques

Synthèse – Mise au point des installations électriques			
	A proscrire	Minimum	Optimal
Electricité	Temporisation de détecteurs trop longues	Régler les temporisations et seuil de luminosité des détecteurs. Régler la gradation avec un luxmètre.	Vérifier la cohérence des sous-comptages.

3.5 Le passage de relais aux utilisateurs et à la maintenance

La conception et le chantier ne sont qu'une courte étape dans la vie d'un bâtiment. L'essentiel est évidemment l'utilisation du bâtiment. Après la Réception et la période de Parfait achèvement, la Maîtrise d'œuvre et les entreprises laissent la place aux utilisateurs, accompagnés de l'entreprise de maintenance, et selon les cas d'un exploitant, gestionnaire, syndic de copropriété, etc.

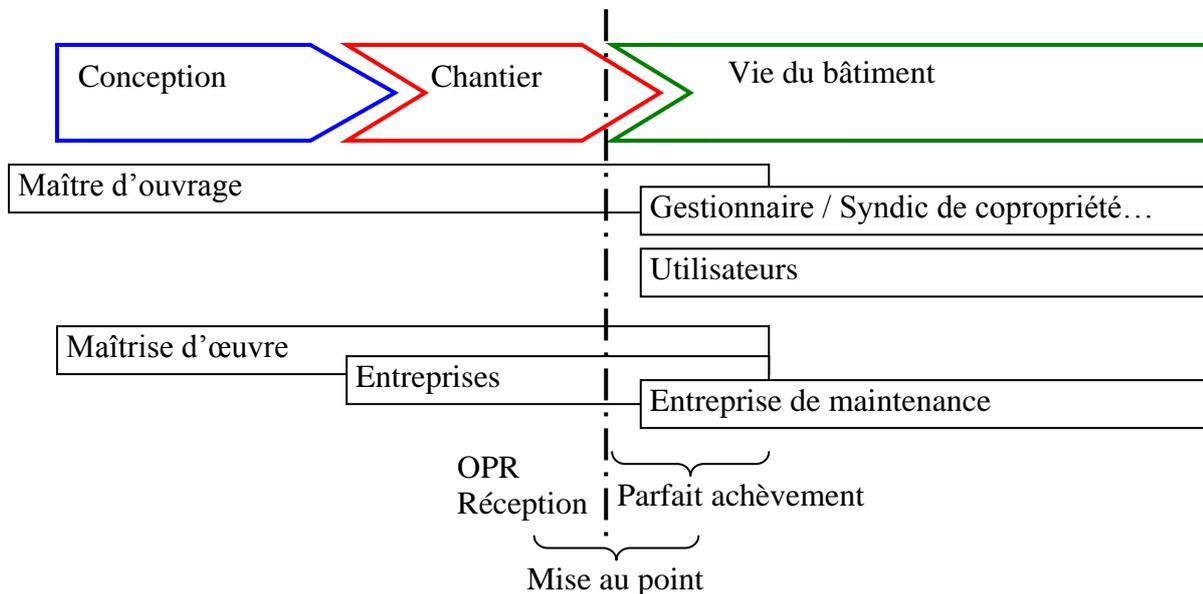


Schéma de l'implication des différents acteurs au cours de la vie du bâtiment

L'objet de cette partie est de présenter les enjeux et les bonnes pratiques du passage de relais à la maintenance et à l'exploitant.

3.5.1 Comment organiser la transmission des informations ?

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Parfait achèvement	Entreprise, maîtrise d'œuvre, maintenance	Transmettre les informations nécessaires à l'entreprise de maintenance et aux utilisateurs.

❖ Enjeux

Le travail des entreprises de maintenance est souvent critiqué. Mais mettons-nous à leur place : comment connaître une vingtaine d'installations différentes, et agir efficacement sur chacune dans un temps limité ? Pour que la maintenance pérennise un fonctionnement performant, **il faut avant tout qu'on lui dise précisément ce qu'on attend d'elle !** La Maîtrise d'œuvre a transmis son travail de conception aux entreprises du chantier par le DCE (encore faut-il que les séquences de régulation y soient détaillées). Mais bien souvent, sur le terrain, les techniciens de maintenance n'ont pas accès à ces documents, ni aux mises à jour et aux valeurs des réglages réalisés par les entreprises avec la Maîtrise d'œuvre en phase de Mise au point.

Cette situation conduit inexorablement vers des équipements réglés « à fond », par défaut d'information et par manque de temps et d'intérêt pour la performance.

Cette transmission est en théorie le rôle des **DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés)**. Or, les DOE sont actuellement la plupart du temps un catalogue de documentation, très volumineux, peu pratique, et en un mot inutilisable par l'entreprise de maintenance au quotidien. Mettons nous à la place de l'entreprise de maintenance : à son arrivée dans une chaufferie, elle ne dispose en général que d'un schéma de principe.

De quelles informations a-t-elle besoin ?

- ✓ **Où sont situés les équipements** dont je dois m'occuper (ballons ECS en faux plafond, CTA en toiture ou en faux plafond) ?
- ✓ Quelle est la **périodicité** des actions que je dois mener ?
- ✓ Quels sont les **points de consigne** des pompes, ventilateurs, régulateurs ?
- ✓ Quelles sont les **séquences de régulation** ?

Tout cela doit être consigné quelque part, dans un document succinct (sinon il est inutilisable sur le terrain) mais précis et complet. Il s'avère donc nécessaire d'ajouter au DOE un **DUEM (Dossier d'Utilisation, d'Exploitation et de Maintenance)**.

Afin d'être très opérationnel, on suggère l'affichage dans les locaux techniques d'un document très succinct à côté du schéma de principe, expliquant les séquences de régulation et les points de fonctionnement optimisés (dossier MAP, établi suite à la Mise au point, cf partie 3.4), ainsi que la périodicité de maintenance. Des plans de repérage doivent également être mis à disposition permettre de connaître la position des différents équipements au sein du bâtiment.

❖ Bonnes pratiques

- ✓ La Maîtrise d'œuvre doit préciser les principes généraux des installations techniques et les séquences de régulation dès la rédaction du DCE ;
- ✓ L'entreprise note les points de consignes résultant de la phase de mise au point des installations, et met à jour les séquences de régulation le cas échéant ;
- ✓ Les DOE comportent la mise à jour des principes généraux des installations techniques, les plans, les CCTP mis à jour, etc. ;
- ✓ Les séquences de régulation sont affichées en chaufferie à côté du schéma de principe. Les points de consigne sont également affichés en chaufferie et dans les locaux CTA ;
- ✓ Un plan de repérage des équipements techniques (notamment ceux en faux plafond) est mis à disposition dans un des locaux techniques ;
- ✓ Un DUEM est rédigé à l'attention du gestionnaire technique pour lui présenter des recommandations pratiques pour la conduite des installations par les futurs intervenants techniques. La périodicité des actions de maintenance est précisée. Le dossier MAP (Mise Au Point) est une partie importante du DUEM. Le DUEM peut être constitué de fiches pratiques pour faciliter la gestion technique opérationnelle.

❖ Le passage de relai aux utilisateurs

Les utilisateurs d'un bâtiment à basse consommation ont eux aussi la performance entre leurs mains. Ils peuvent également avoir des difficultés légitimes à s'approprier des installations techniques qu'ils ne comprennent pas. Il est donc nécessaire d'assurer également une transmission d'information à leur attention.

- ✓ Idéalement, **une réunion d'information** sera organisée par le Maître d'ouvrage au début de l'utilisation des bâtiments. La Maîtrise d'œuvre pourra présenter l'opération, sa performance, ses particularités techniques. Sans entrer dans le détail technique, quelques photos permettront aux utilisateurs de démystifier et de s'approprier les installations.

- ✓ Ce type de réunion est également l'occasion de présenter ce qui a été conçu pour améliorer le vivre ensemble.
- ✓ Un **livret utilisateur / locataire** sera réalisés, pour faciliter l'appropriation des locaux, sensibiliser aux enjeux énergétiques, et donner des conseils de bonne utilisation.

❖ *L'importance des sous compteurs*

Disposer de sous compteurs énergétiques est aussi important pour le gestionnaire du bâtiment que le compteur de vitesse d'une voiture. Ces sous compteurs permettent :

- ✓ De mieux comprendre le fonctionnement de l'installation
- ✓ De détecter des dérapages de consommation énergétique (typiquement encrassement de filtres, mais aussi défaut de productivité solaire) et des dysfonctionnements qui sont imperceptibles sans ces outils (il est rare que les utilisateurs se plaignent de défaut de ventilation, et pour le solaire l'appoint couvre le défaut de production solaire, ce qui le rend totalement imperceptible par l'utilisateur)

La RT 2012 impose un certain nombre de ces compteurs (article 23 pour les bâtiments de logements, article 31 pour le tertiaire).

Pour la maintenance et l'exploitation, il est important de vérifier la cohérence des index affichés à la prise en main du bâtiment. Un index resté à zéro indique soit un dysfonctionnement grave, soit... le mauvais raccordement d'un compteur de chaleur. Bien souvent, le problème est une simple inversion des sondes de température. Vérifier également le calibre des sous-compteurs électriques (facteur multiplicatif sur l'affichage).

La **mise en place d'un tableau de suivi**, ainsi que les ordres de grandeurs attendus (à fournir par le bureau d'étude), permet de vérifier la cohérence des résultats les premières années, puis de repérer rapidement une dérive.

3.5.2 *Bonnes pratiques pour la maintenance*

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Exploitation	Entreprise de maintenance / Exploitant	Remplacement des filtres des CTA. Suivi des installations solaires.

❖ *Chauffage*

Bonnes pratiques

- ✓ Veiller à **conserver les points de consigne optimisés**. Une pompe tournant à pleine vitesse n'assure pas un meilleur service qu'une pompe bien réglée. Au contraire, un réglage optimisé permettra d'importantes économies d'électricité.
- ✓ **Ne pas sur-dimensionner les pompes lors de leur remplacement**. Remplacer à l'identique. Si le modèle n'existe plus, refaire le dimensionnement au point de fonctionnement souhaité (consulter les DOE), sans sur-dimensionner. En effet, une pompe surdimensionnée, même bien réglée, aura un rendement fortement dégradé, et provoquera donc une surconsommation d'électricité.
- ✓ Dans le cas des chaufferies aux plaquettes de bois, **vérifier le taux d'humidité et la qualité du bois livré**. Il ne doit pas y avoir de cailloux dans le silo, et l'humidité doit rester proche de 20%.

Réflexion sur les coûts de maintenance

On peut s'interroger sur les coûts actuellement pratiqués sur la maintenance des chaufferies bois. Dans certains cas, ces coûts élevés peuvent réduire à néant l'intérêt économique de cette énergie.

Il semblerait qu'au delà de la réalité technique (intervention régulière pour le décentrage, intervention en cas de blocage du convoyeur), il y a un effet de nouveauté : le prix est placé très haut par sécurité. Il faut qu'il se rationalise rapidement.

On constate également des incohérences dans les prix : à puissance égale, la maintenance des installations au bois granulés est souvent chiffrée au même prix que celle des installations à plaquettes. Or aujourd'hui les chaufferies aux granulés sont d'une grande fiabilité (peu de risque de blocage de la vis, etc.), et produisent peu de cendres. Leur coût de maintenance devrait donc être peu élevé.

C'est pourquoi on peut recommander aux Maîtres d'ouvrage de bien **différencier dans leurs appels d'offre de maintenance les chaufferies aux granulés des chaufferies à plaquettes.**

❖ Installation solaire

Bonnes pratiques

- ✓ Il est recommandé que l'entreprise de maintenance **vérifie le fonctionnement de l'installation solaire lors de sa prise en main** (dans son propre intérêt comme dans celui du Maître d'ouvrage) : sens des clapets anti-retours, positionnement des vannes (circuit solaire non fermé, ballon solaire non by-passé...), etc.
- ✓ La vérification de la cohérence des températures, et le relevé régulier des compteurs de chaleur permettent également de s'assurer rapidement que l'installation est fonctionnelle.
- ✗ On attire en particulier l'attention de la maintenance sur la **pression de pré-gonflage du vase d'expansion** du circuit solaire : une pression insuffisante par rapport à la hauteur du bâtiment rend l'installation très vulnérable à la moindre surchauffe, car le volume utile du vase d'expansion se trouve diminué. Il s'ensuit le cercle vicieux de la perte d'eau glycolée, puis de la présence d'air dans le circuit solaire qui ne permet plus à la pompe d'assurer la circulation, et ainsi un arrêt complet de la production solaire.
- ✓ Au cours de l'exploitation, et en particulier **à la fin de chaque été, vérifier le remplissage du circuit solaire**. Si la pression est insuffisante, effectuer l'appoint eau glycolée (pas en eau pure !), ainsi que la purge de tout le circuit solaire. Vérifier que le circuit solaire circule effectivement à nouveau (sur le débit-mètre à flotteur par exemple) après ces opérations.

Réflexion sur les coûts

On peut s'étonner du fait que la maintenance des installations solaire coûte souvent cher, sans pour autant toujours garantir un bon fonctionnement. Certains Maîtres d'ouvrage sont découragés par des dysfonctionnements récurrents des installations solaires, et au final un bilan économique désastreux, puisque leur investissement ne leur permet aucune économie, et au contraire une dépense de maintenance supplémentaire.

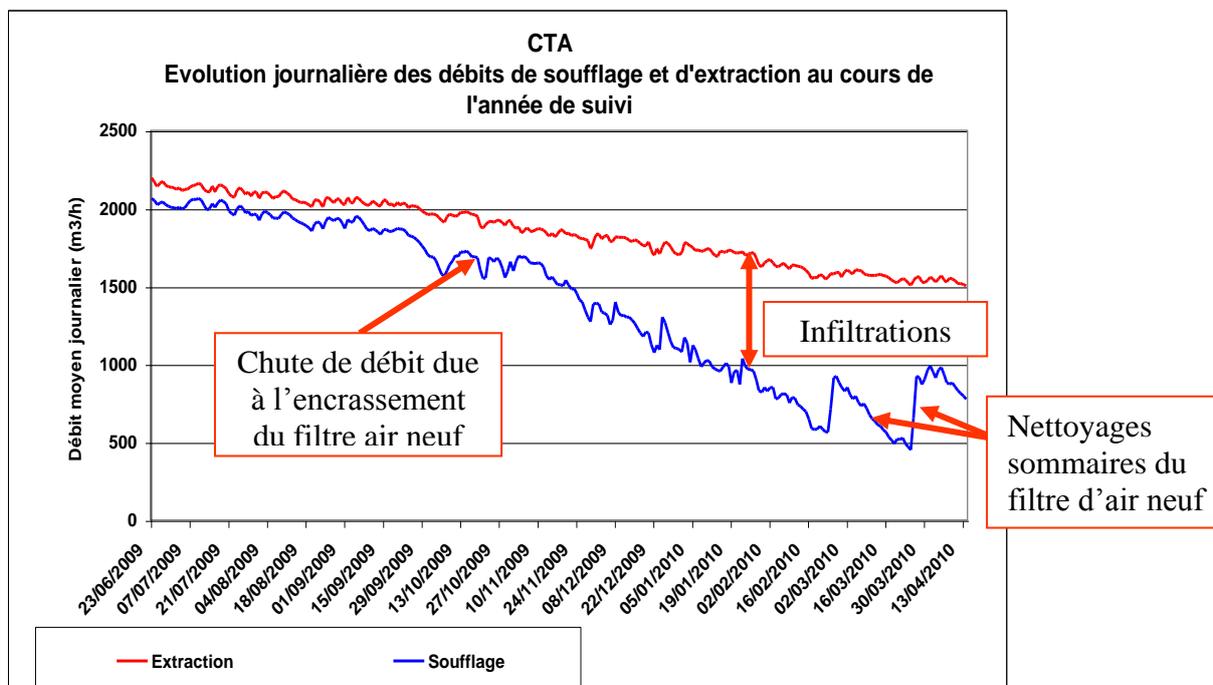
Cet état de fait n'est en aucun cas une fatalité. Mais il est nécessaire d'aller vers plus de simplicité à la conception, d'assurer une meilleure qualité de réalisation en phase chantier, et enfin que les entreprises de maintenance se forment et maîtrisent leurs coûts.

Une prise de conscience urgente de tous les acteurs de cette filière est nécessaire. Sinon demain, il sera plus rentable de faire de l'eau chaude solaire avec des photopiles reliées à des ballons électriques...

❖ Ventilation

Le principal enjeu de la maintenance est **l'encrassement des filtres des installations double flux**. Les conséquences de cet encrassement sont de façon générale :

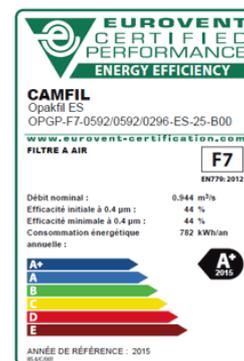
- ✗ Un mauvais fonctionnement de l'installation : les débits d'air ne sont plus assurés, ce qui entraîne la dégradation de la qualité de l'air ;
- ✗ Une surconsommation électrique très importante des ventilateurs ;
- ✗ Le déséquilibre entre le débit d'air repris et celui d'air soufflé, ce qui entraîne des infiltrations d'air froid, donc de l'inconfort et une surconsommation de chauffage.



Résultat de campagne de mesure (hors AAP) montrant la vitesse d'encrassement des filtres d'air neuf (F7), et l'impact sur les débits : en 9 mois, le débit de soufflage a chuté de 70%. Le débit d'air extrait a chuté moins vite car le filtre d'air extrait est de type G4 et s'est moins encrassé. La différence entre les deux est compensée par des infiltrations. On voit en outre que les nettoyages sommaires des filtres sont inefficaces : le remplacement est nécessaire pour réduire durablement la perte de charges.

Bonnes pratiques

- ✓ Remplacer (et pas seulement nettoyer) les filtres **tous les 4 mois en zone urbaine**.
- ✓ Il existe à présent différentes classes énergétiques de filtres³², la classe A étant celle qui génère le moins de pertes de charges. Leur surface spécifique étant plus grande, leur encrassement est également en principe plus lent.
Ci-contre : exemple de classe énergétique de filtre
- ✓ On souligne qu'il n'est généralement pas nécessaire du point de vue de la protection de l'échangeur d'avoir un filtre F7 : celui-ci a une fonction uniquement de confort (filtre à pollen). On peut tout à



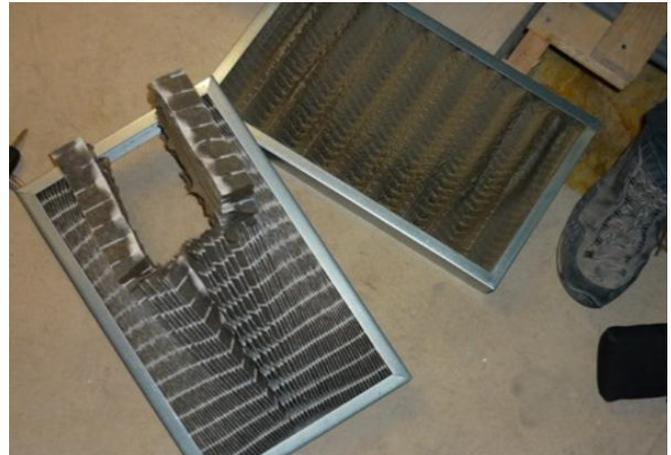
³² Classification énergétique Eurovent : le classement de A+ (classe la plus performante) à E (la plus énergivore) est évaluée en consommation électrique induite par la perte du charge du filtres. Un tableau fixe des objectifs de consommation en fonction du niveau de filtration, évalué au sens de la norme EN 779:2012. Ainsi, de façon logique, un filtre de finesse F7 de classe énergétique A aura « le droit » de consommer plus qu'un filtre plus grossier G4, également en classe A.

fait le remplacer à l'occasion de la maintenance par un filtre G4 qui coûtera moins cher et s'encrassera moins vite.

- ✓ L'idéal étant de disposer d'un pré-filtre G4 avant un filtre F7. C'est le filtre G4 qui sera à changer régulièrement. Il protégera le filtre F7, qui est plus coûteux.



Filtre d'air neuf encrassé (pré-filtre en toiture sur une installation à échangeurs individuels)



Filtre de CTA tellement encrassé que la pression du ventilateur l'a fait éclater (hors AAP).

Réflexion sur les coûts

Pourquoi la maintenance des installations en ventilation double flux est-elle si chère ?

D'abord, rappelons que **les installations en ventilation simple flux nécessitent également une maintenance** : révision des ventilateurs tous les ans (avec un accès souvent difficile), et curage des réseaux tous les deux ans. **Qui réalise ces prestations actuellement ? Quasiment personne.** On compare donc une réelle maintenance en double flux à une absence induite de maintenance en simple flux.

Par ailleurs, la principale différence technique est la présence de filtres en ventilation double flux. Ceux-ci apportent **un service supplémentaire à l'utilisateur**, qui est la qualité de l'air qu'il respire.

Enfin, il semble possible **d'optimiser le coût du remplacement de ces filtres** :

- ✓ Les filtres en eux-mêmes ne coûtent pas cher, notamment les filtres G4. C'est donc le déplacement qui coûte cher. Pourquoi celui-ci n'est-il pas mutualisé avec les déplacements nécessaires pour la chaufferie par exemple ?
- ✓ Comme évoqué précédemment, la conception doit intégrer cet impératif de maintenance : non seulement on doit prévoir assez de place pour permettre de sortir les filtres, mais aussi il faut **prévoir un accès de plein pieds aux locaux CTA** par escalier (et non par un lanterneau ou par une échelle à crinoline). Alors le remplacement des filtres ne sera qu'une formalité, réalisée en peu de temps, au lieu du parcours du combattant qu'il peut représenter sinon (avez-vous déjà essayé de transporter un filtre de CTA par une échelle à crinoline ?).

On peut conseiller aux Maîtres d'ouvrage de réaliser eux-mêmes le remplacement des filtres, notamment dès qu'ils disposent de personnel d'entretien sur site. Ce n'est pas du tout un geste technique, tout le monde peut le faire (surtout si l'accès est de plein pieds), et dans l'état actuel du marché de la maintenance cela coûtera bien moins cher !

3.5.3 Questions sur la maintenance

Phase	Acteur concerné	Vigilance
Exploitation	Maintenance, Maîtres d'ouvrage	Formation des équipes de maintenance aux bâtiments à basse consommation. Maîtrise des coûts.

❖ *Enjeux*

Les observations réalisées dans le cadre des visites de Mise au Point des Appels à Projets dressent un tableau peu flatteur de la maintenance dans le bâtiment :

- ✖ **Parfois aucune entreprise de maintenance n'était missionnée par le Maître d'ouvrage, et ce plus de 6 mois après la réception.** Il faut rappeler que la période de parfait achèvement n'implique absolument pas la réalisation des interventions de maintenance par l'entreprise qui a réalisé les travaux. L'entreprise de maintenance doit être missionnée dès la Réception.
- ✖ Les observations de terrain laissent des **doutes sur les compétences des entreprises de maintenance missionnées en matières d'installations performantes** comme le solaire thermique ou la ventilation double flux.

Aujourd'hui, le cœur de métier des entreprises de maintenance reste un parc de bâtiments non performants. **La culture du bâtiment basse consommation n'est donc pas au centre des priorités de ces entreprises.** Pourtant, un **effort de formation** semble indispensable si l'on souhaite la réussite de tous les bâtiments que l'on construit depuis la mise en place de la RT 2012.

Dans le même temps, un travail sur le coût des prestations de maintenance doit être effectué. Avec la généralisation des installations performantes, les coûts doivent chuter. Les prix pratiqués sur certaines prestations (ECS solaire, chaufferie bois, ventilation double flux,...) semblent injustifiés par rapport à la réalité du travail nécessaire, et par rapport à la qualité de la prestation effectivement réalisée.

❖ *Pour aller plus loin :*

- ✓ *Guide entretien et maintenance, rédigé en septembre 2012 suite aux retours d'expérience de missions d'AMO, notamment (mais pas seulement) celle des Appels à Projets de la région Bourgogne, et à une série de campagnes de mesures réalisées par Enertech, disponible sur <http://www.enertech.fr/rubrique-Le+chantier%2C+la+maintenance%2C+l%27exploitation-6-221.html#page>*
- ✓ *Mémento du Commissionnement, réalisé par le COSTIC, et présentant les conclusions du groupe de travail Commissionnement, <http://www.costic.com/poles-de-competence/commissionnement>*

4 Evaluation environnementale et économique des Appels à Projets

4.1 Indicateurs environnementaux

4.1.1 Méthodologie utilisée

❖ Impacts des projets lauréats

Les données qui suivent sont basées essentiellement sur les Calculs de consommations tous usages effectués par les Maîtres d'œuvre des opérations, avec l'outil fourni dans le cadre de l'Appel à Projet 2008 (voir § 2.3.8). 44 calculs ont ainsi été compilés.

Si le calcul n'a pas été effectué (cas de la plupart des opérations des Appels à Projets 2006 et 2007), les consommations ont été estimées sur la base d'une méthodologie similaire à la méthode de calcul des consommations tous usages (44 opérations concernées).

Si des données de mesure étaient disponibles suite aux visites de Mise au Point ou des données transmises par les Maîtres d'ouvrage, celles-ci sont prises en compte (10 opérations concernées).

❖ Impacts de référence

La référence pour le calcul des impacts évités grâce aux Appels à Projets est le niveau de performance RT 2005 dans le cas des opérations neuves, et des bâtiments existants non rénovés dans le cas des rénovations.

Les hypothèses faites sont les suivantes : consommations en kW.h/m².an d'énergie finale par typologie :

		Chauffage au Gaz	Chauffage Electrique	ECS collective Gaz	ECS Electrique	Elec.des communs	Electricité spécifique
RT2005	Logement collectif	80		35		15	28
	Maison		75		15		32
	Tertiaire	80			15	15	65
Existant	Logement collectif	200		40		5	28
	Maison		200		15		32
	Tertiaire	200			15	5	65

Ces valeurs sont des ordres de grandeur issus de données de mesure d'Enertech.

❖ Valeurs d'impact

En cohérence avec l'outil de calcul, les coefficients d'énergie primaire suivants sont pris en compte :

	Electricité	Gaz naturel	Bois
kW.h EP / kW.h EF	3	1	0,2

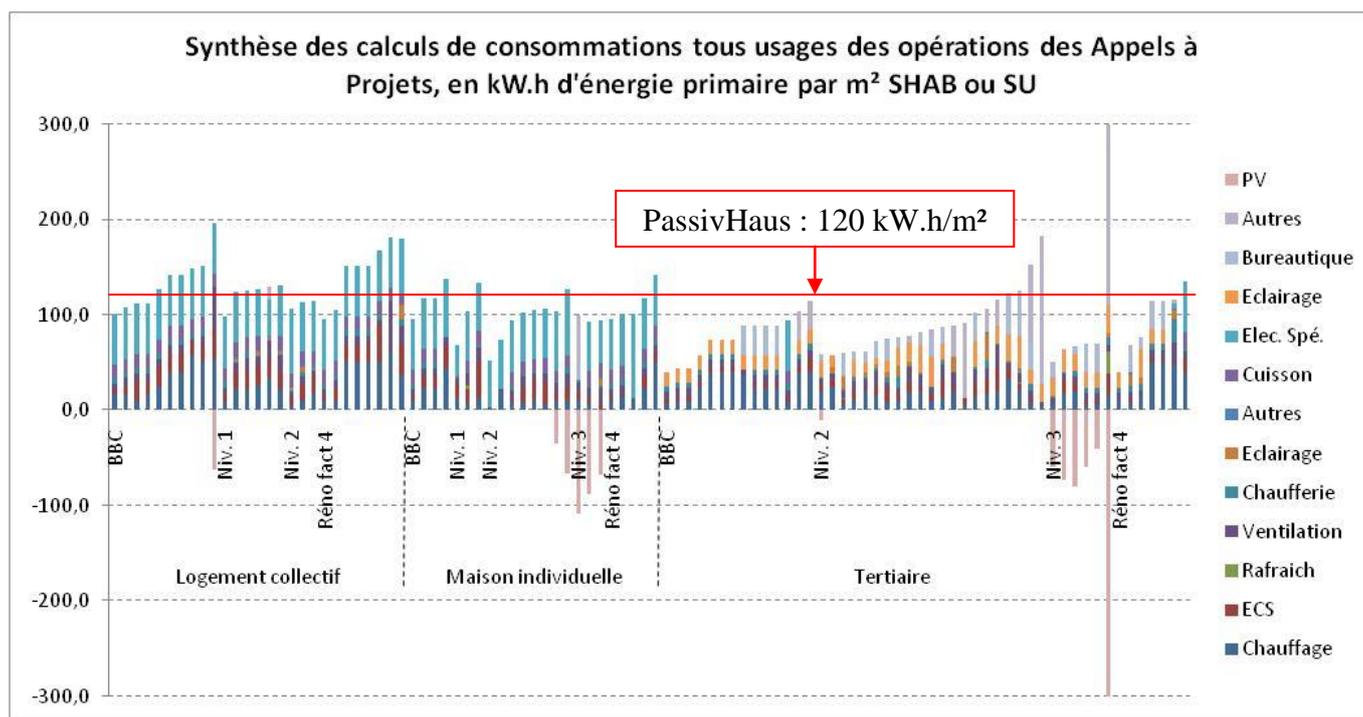
Pour l'impact climatique, nous avons adopté les valeurs suivantes :

	Electricité	Electricité pour le Chauffage	Gaz naturel	Bois	Réseau de Chaleur
kg CO ₂ / kW.h	0,054	0,180	0,234	0,020	0,22 *

* Hypothèse d'un réseau de chaleur 60% Biomasse, avec un rendement de génération de 80% et un rendement de distribution de 60%.

4.1.2 Impact évité en énergie primaire

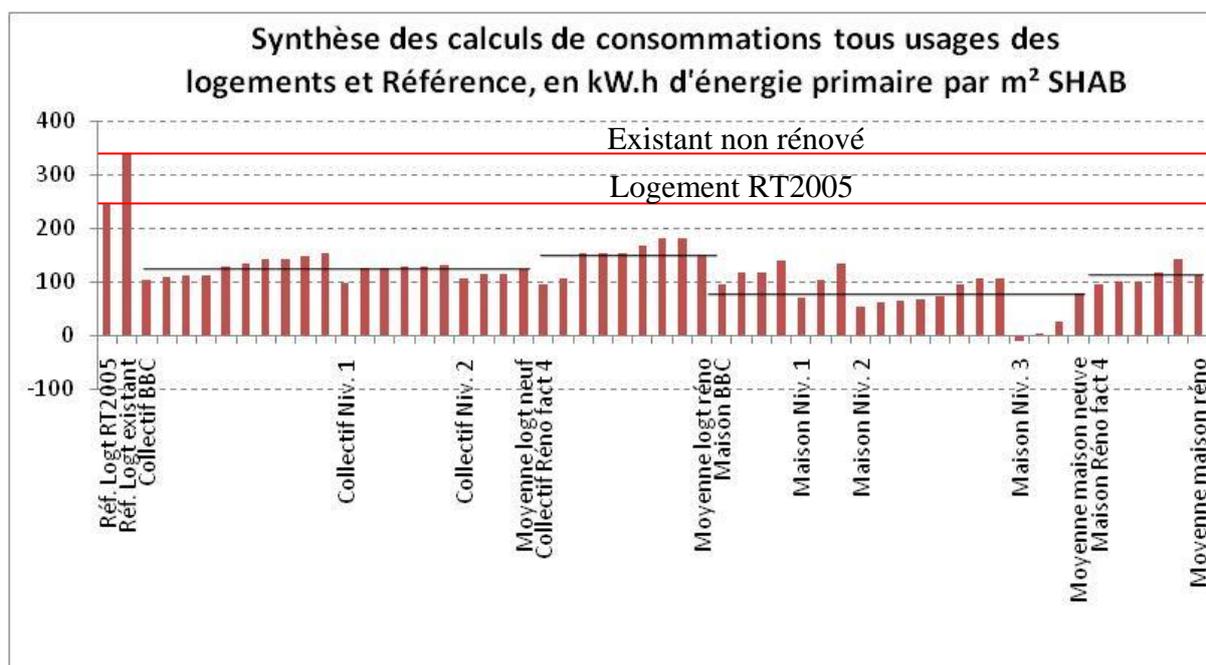
Le graphique ci-dessous présente les résultats des calculs, estimations et mesures pour l'ensemble des opérations lauréates des Appels à Projets :



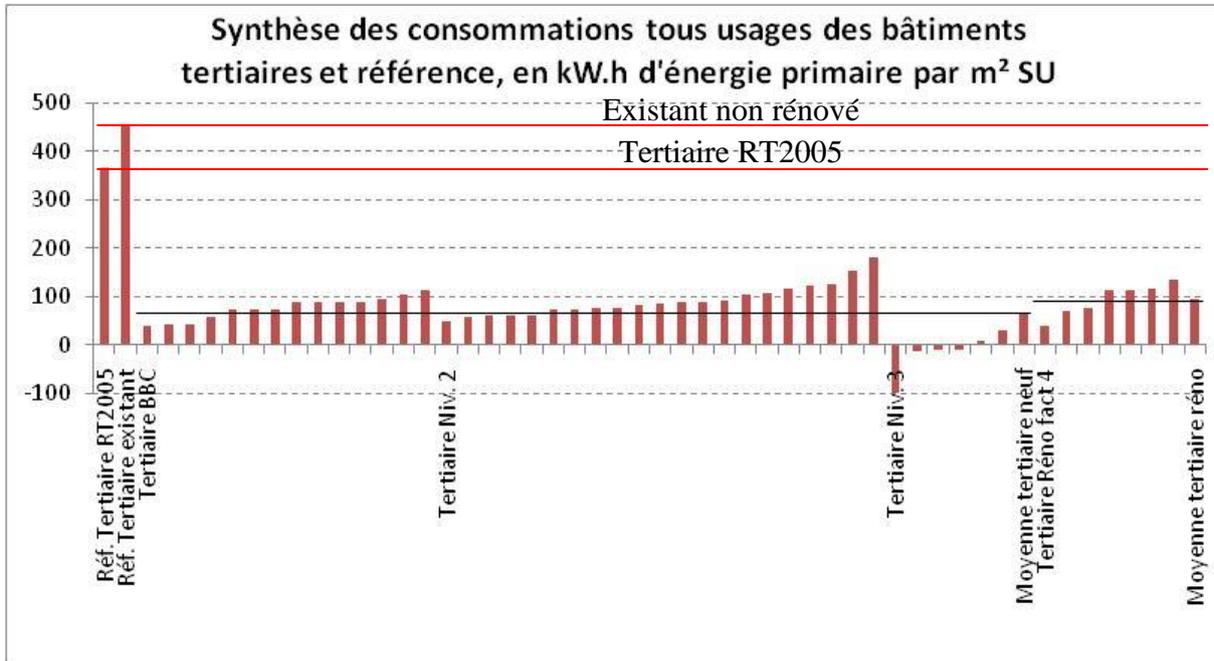
Résultats des calculs de consommations tous usages des opérations lauréates des Appels à Projets.

On rappelle que ces valeurs incluent tous les usages, et sont établies par un calcul physique et non par méthode conventionnelle. Il convient donc de comparer ces valeurs non pas aux 50 kW.h/m² sur 5 usages et en calcul réglementaire du BBC RT2005, mais plutôt aux 120 kW.h/m² du label allemand PassivHaus.

Si l'on compare ces valeurs aux valeurs de référence (construction RT2005 et absence de rénovation), on obtient les graphiques suivants :



Résultats des calculs de consommations tous usages des opérations de logements, comparées aux références. Les traits noirs sont les moyennes par catégories.

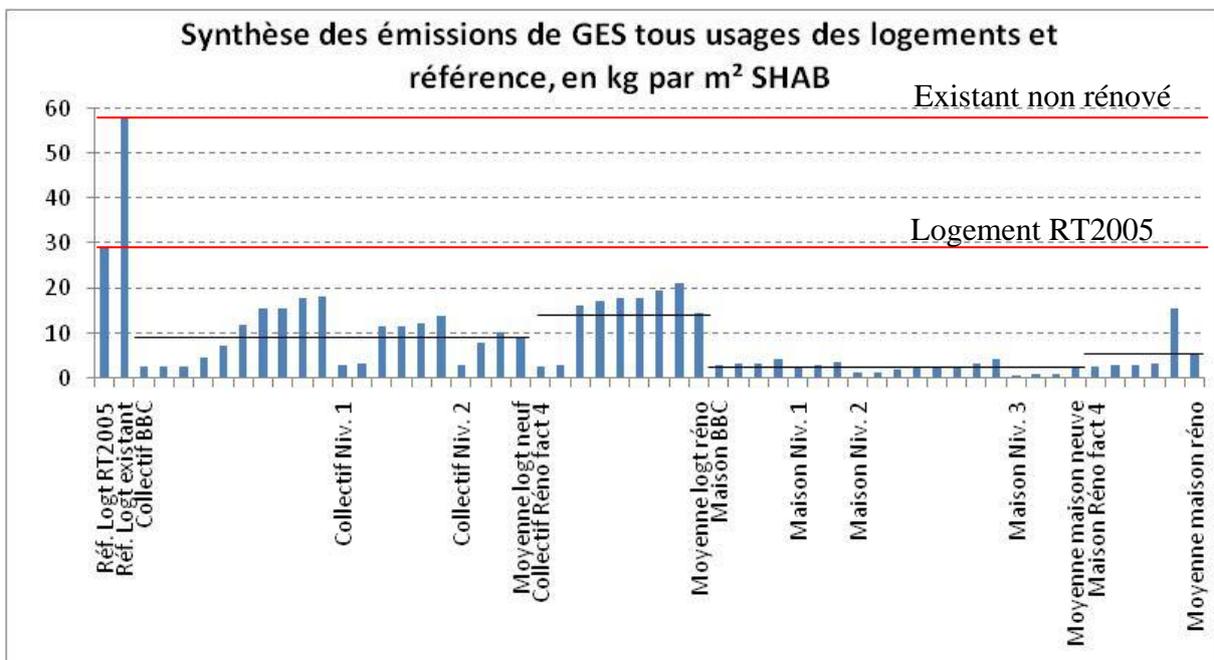


Résultats des calculs de consommations tous usages des opérations tertiaires, comparées aux références, et moyennes par catégories.

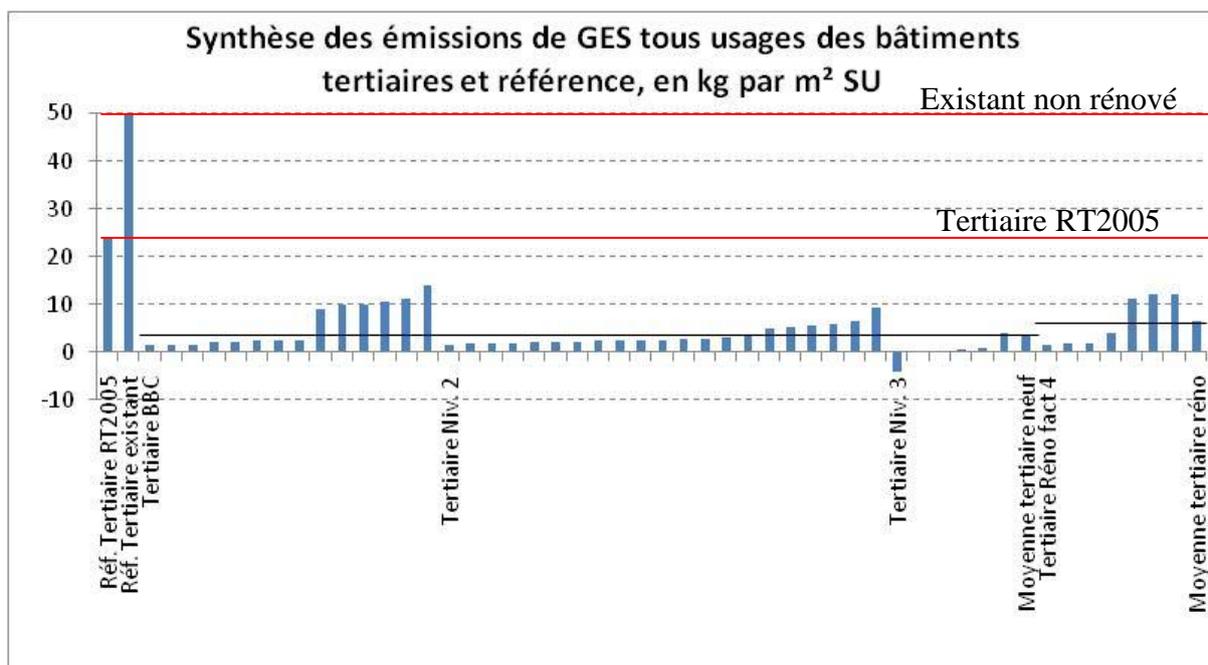
On peut ainsi estimer que les Appels à Projets ont fait économiser au total un peu moins de 30 000 MW.h par an d'énergie primaire, soit sur une durée de vie de 60 ans **1 750 000 MW.h d'énergie primaire**, soit **175 000 000 litres de fioul** ou encore 152 000 tep (tonnes d'équivalent pétrole).

4.1.3 Impact climatique évité

De la même façon, les graphiques ci-dessous présentent les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) en kg d'équivalent CO₂ par m² et par an :



Résultats des émissions de GES calculées pour les opérations de logements, comparées aux références. Les traits noirs sont les moyennes par catégories.



Résultats des émissions de GES calculées pour les opérations tertiaires, comparées aux références, et moyennes par catégories.

On peut ainsi estimer que les Appels à Projets ont fait économiser au total un peu moins de 3 000 tonnes de CO₂ par an, soit sur une durée de vie de 60 ans **178 000 tonnes d'équivalent CO₂**.

4.2 Indicateurs économiques

4.2.1 Coût travaux en neuf

Les données de coûts travaux présentées dans ce qui suit sont issues des fiches « Opération exemplaire » réalisées par Bourgogne Bâtiment Durable, portant sur des opérations lauréates des Appels à Projets.

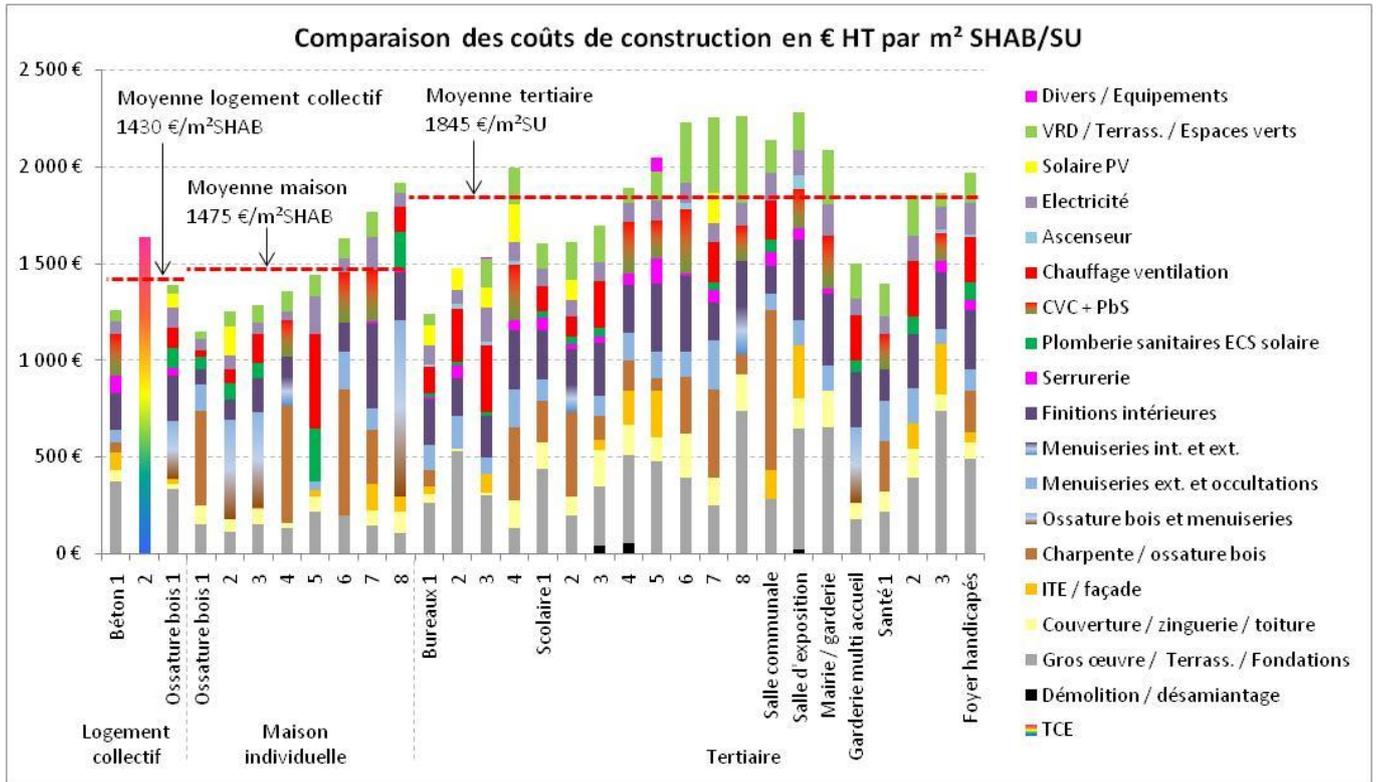
Ces fiches, très détaillées, sont disponibles sur :

<http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/observation/dossiers-techniques.html#c5108>

Il s'agit des coûts travaux réels, non actualisés. Les honoraires de maîtrise d'œuvre ne sont pas inclus, ni les coûts du foncier et autres dépenses des Maîtres d'ouvrages. Ces informations sont en revanche disponibles sur les fiches « Opération exemplaire » de Bourgogne Bâtiment Durable.

❖ Coût total des travaux

Le graphique suivant présente ainsi les coûts travaux HT par lot de 31 opérations (3 bâtiments de logement collectif, 8 maisons individuelles et 20 bâtiments tertiaires).



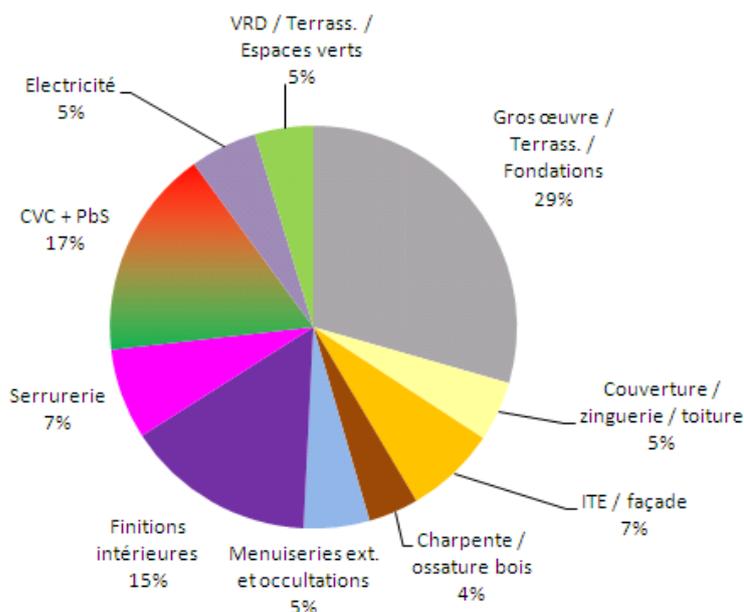
Coûts de construction de 31 opérations lauréates des Appels à Projets, exprimé en € HT par m² Habitable ou Utile. Détail par lot.

On note sur le graphique des coûts moyens de construction de 1430 €/m² SHAB en logement collectif à 1845 €/m² SU en tertiaire, en passant par 1475 €/m² SHAB pour les maisons individuelles.

Rapporté au m² SHON, ces valeurs sont de 1265 €/m² SHON en logement collectif, 1210 €/m² SHON pour les maisons individuelles et 1620 €/m² SHON en tertiaire.

❖ Répartition par lot

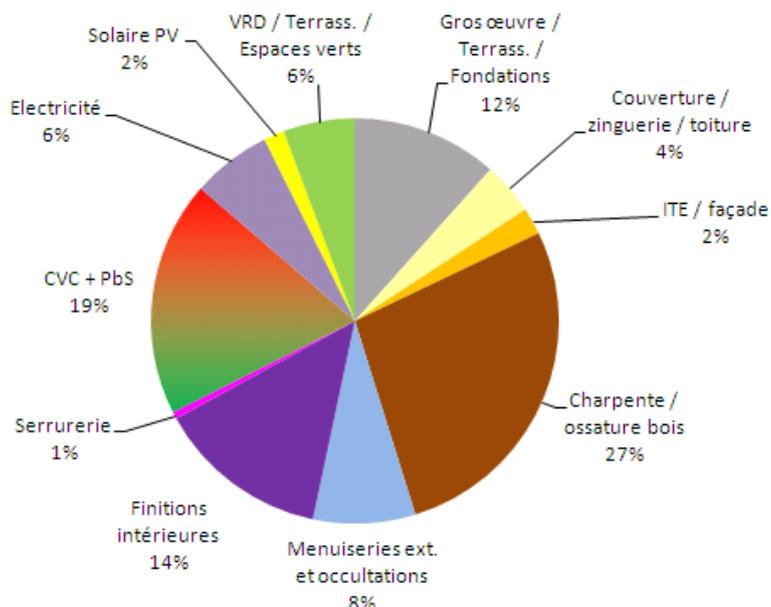
Répartition par lot - Logement en maçonnerie



Ci-contre : Répartition par lot des coûts de construction – Logement en maçonnerie (données basées sur une seule opération de logement collectif)

Sur cette opération de logement collectif en maçonnerie, les lots principaux sont le Gros œuvre (29%), le lot Plomberie / Sanitaires / Chauffage / Ventilation (17%) et l'ensemble des finitions intérieures (15%).

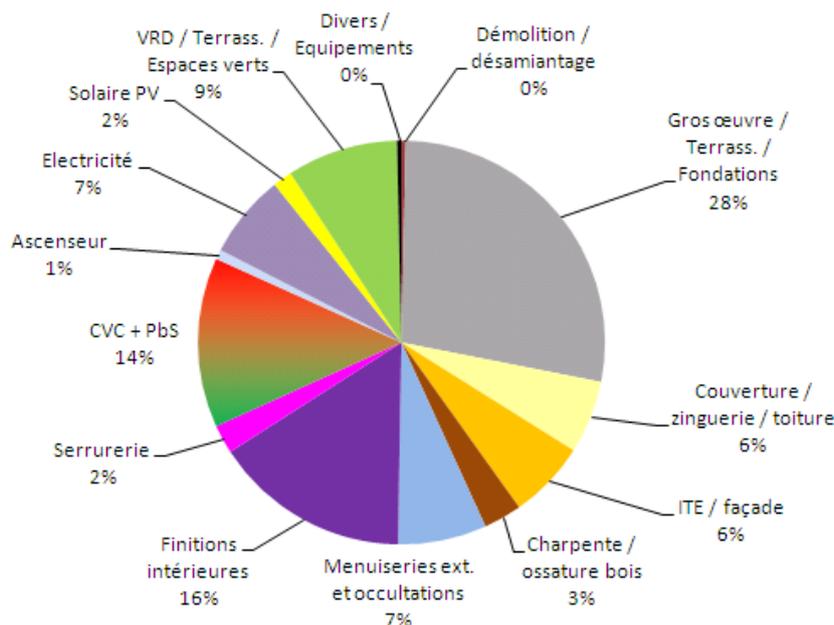
Répartition par lot - Logement en ossature bois



Ci-contre : Répartition par lot des coûts de construction – Logement en ossature bois (données basées sur une opération de logement collectif et 8 maisons individuelles)

Pour les logements en ossature bois, le lot Charpente / Ossature bois représente 27% du coût de la construction, suivi du lot Plomberie / Sanitaires / Chauffage / Ventilation (19%) et l'ensemble des finitions intérieures (14%). Vient ensuite le Gros œuvre avec 12%.

Répartition par lot - Tertiaire en maçonnerie

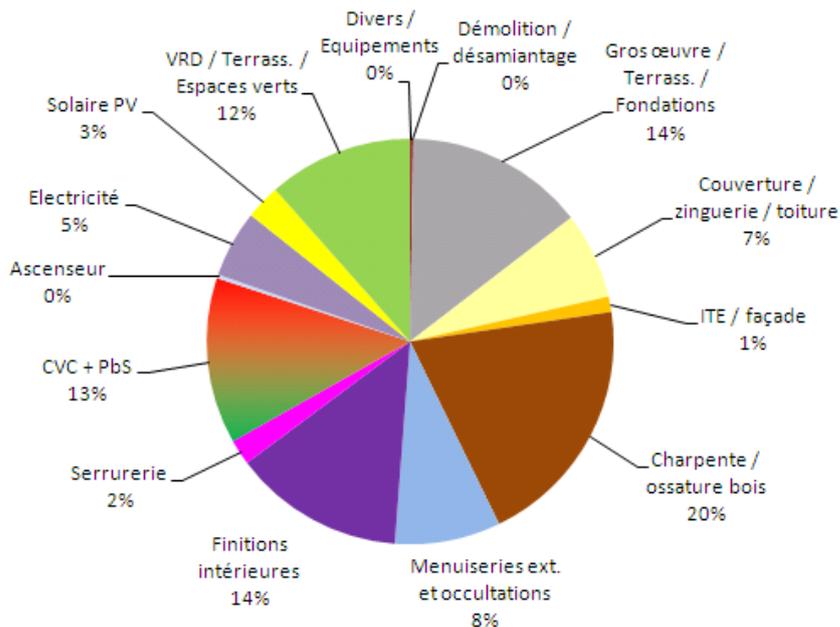


Ci-contre : Répartition par lot des coûts de construction – Tertiaire en maçonnerie (données basées sur 11 bâtiments tertiaires)

Pour les opérations tertiaires en maçonnerie, le Gros œuvre représente 28% du coût de construction. Viennent ensuite les finitions intérieures (16%) et le lot Plomberie / Sanitaires / Chauffage / Ventilation (14%).

Ci-contre : Répartition par lot des coûts de construction – Tertiaire en ossature bois (données basées sur 9 bâtiments tertiaires)

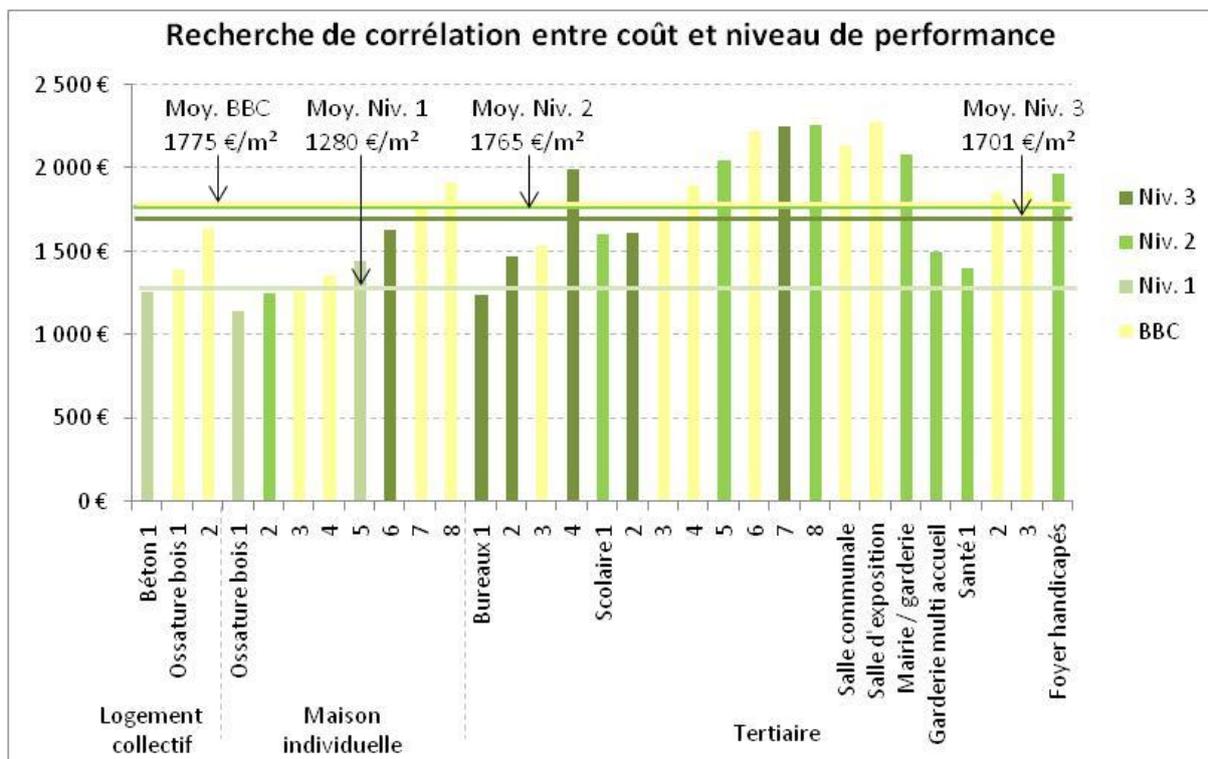
Répartition par lot - Tertiaire en ossature bois



Enfin, pour les opérations tertiaires en ossature bois, les lots principaux sont la Charpente / Ossature bois (20%), puis les finitions intérieures, le lot Plomberie / Sanitaires / Chauffage / Ventilation et le Gros œuvre ont une part comparable (13 à 14%).

❖ Explication des niveaux de prix

Les coûts constatés sont assez variables d'une opération à l'autre. On peut donc se demander si les coûts les plus élevés sont ceux des opérations les plus performantes :

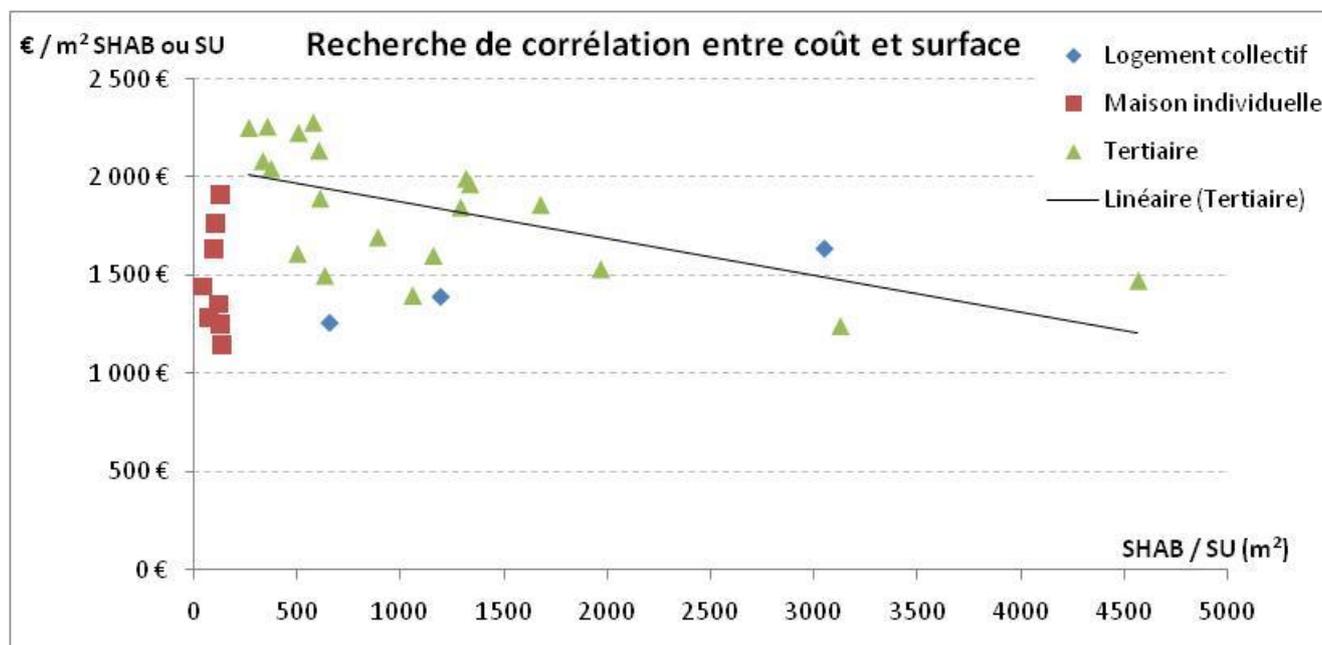


Coûts de construction et niveau de performance dans les Appels à Projets.

On voit ici qu'il n'y a aucune corrélation entre coût et niveau de performance. Le coût moyen des opérations BBC (Appels à Projets 2006 et 2007, 14 opérations) est même supérieur à celui des opérations Niveau 1 (BBC renforcé, 3 opérations), et tout à fait comparable à celui des opérations Niveau 2 (Passif, 8 opérations) et Niveau 3 (Bâtiment à énergie positive, 6 opérations) au sens de l'Appel à Projets 2008.

Une autre corrélation possible pour expliquer les écarts de prix entre opérations est le fait que les opérations de petite taille sont souvent plus chères au m², en raison de leur faible compacité de taille.

Le graphique suivant étaye cette hypothèse :



4.2.2 Coût travaux des logements en rénovation

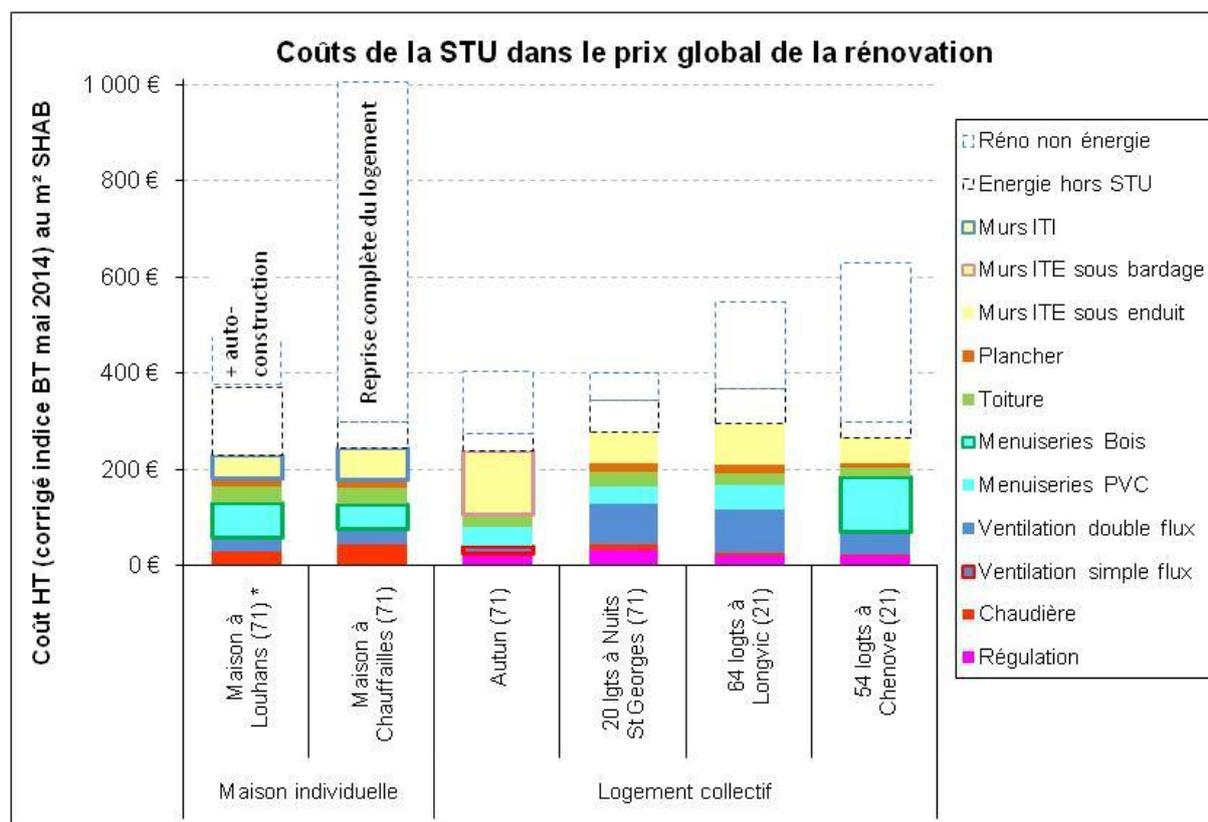
Au total, 20 rénovations « facteur 4 » ont été suivies dans le cadre des Appels à Projets.

Nous allons aborder ici les **rénovations de logements**, car les rénovations tertiaires étaient des rénovations très lourdes avec changement d'usage, dont les données économiques sont difficilement extrapolables. Nous avons également écarté une réhabilitation lourde avec changement d'usage en logement, et limité le champ d'étude aux travaux réalisés par des entreprises, et non en auto-construction. Nous étudierons donc ici ces 6 opérations représentatives.

Les prix sont hors taxes, et ne comprennent pas les honoraires de maîtrise d'œuvre ni les frais divers (assurances, etc). Ils sont rapportés à l'indice BT01 de mai 2014.

Le graphique suivant présente les coûts constatés, en séparant :

- le coût des travaux **liés aux exigences des Appels à Projets** (y compris les sujétions induites, comme le déplacement des chutes EU lorsqu'on isole par l'extérieur, ou la création de faux plafond lorsqu'on crée une ventilation double flux),
- les **autres coûts liés à l'énergie** (remplacement de réseaux, de radiateurs, etc. en raison de leur vétusté),
- et enfin les coûts **non liés à l'énergie** (amélioration des logements, renouvellement des équipements sanitaires, etc.).

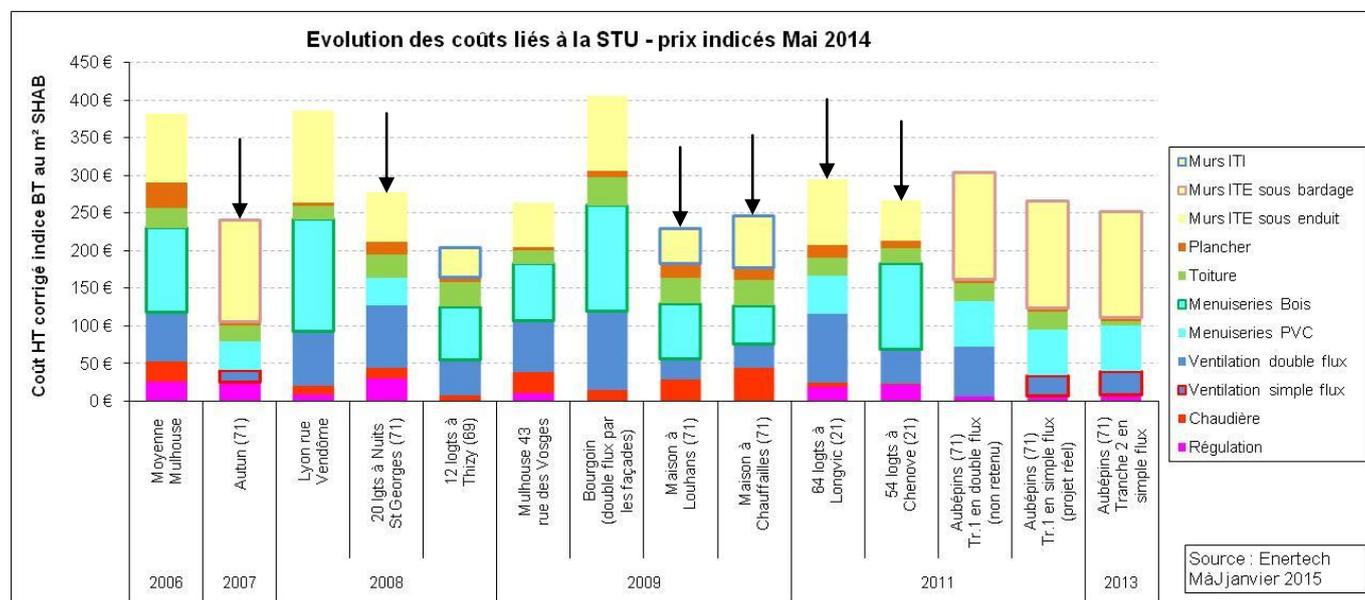


Analyse du coût de rénovations de logements, entre exigences des Appels à Projets (en couleurs), autres coûts liés à l'énergie, et travaux non liés à l'énergie.

* pour la Maison à Louhans, la génération très performante mise en place a été remplacée ici par une simple chaudière Gaz à condensation, qui aurait suffi à respecter les exigences de l'Appel à Projet. Le surcoût de la solution réelle de chauffage (PAC géothermique) est incluse dans les coûts « Energie hors STU ».

On constate que les coûts liés au bouquet de travaux imposé par les Appels à Projets (décrit au § 1.2.1) sont compris entre 229 et 294 € / m² SHAB, avec une **moyenne à 259 € / m² SHAB**.

On peut situer ces prix dans le cadre plus large d'études économiques du même bouquet de travaux (STU) en dehors des Appels à Projets :



Coût du bouquet de travaux « STU » : comparaison d'opérations lauréates des Appels à Projets avec d'autres opérations, dans l'ordre chronologique des dates d'appel d'offre.

On voit que le prix des STU des opérations suivies dans le cadre des Appels à Projets, repérées par une flèche, sont dans la moyenne d'opérations réalisées par ailleurs.

Ceci montre la faisabilité de rénovations « facteur 4 » (division par 4 des consommations de chauffage) avec un budget de rénovation énergétique autour de 250 € HT /m² SHAB.

4.2.3 Réflexions sur l'économie des projets

Plus on isole, plus le lot chauffage est cher ?

(Question posée au colloque de retours d'expérience des Appels à Projets du 30/05/2013)

Ça a été le cas dans certaines opérations. A contrario d'autres opérations ont montré qu'il était possible de générer des moins-values sur le chauffage grâce à la performance de l'enveloppe. On peut notamment citer le cas des maisons individuelles chauffées avec un simple poêle à bois, grâce à la performance de l'enveloppe et à la ventilation double flux qui contribue à répartir la chaleur.

Afin de produire des bâtiments performants à faible coût, c'est évidemment dans ce sens qu'il faut travailler. C'est notamment pourquoi il est important de proscrire les surpuissances, qui sont inutiles et renchérissent les projets.

D'autre part, dans certaines opérations le lot chauffage présente un coût important, car on a investi dans une chaufferie bois ou dans une pompe à chaleur. Il ne s'agit pas ici d'une simple dépense, mais d'un investissement qui doit générer des économies financières (maintenance comprise) pendant toute la durée de vie de l'installation (20 à 25 années). Une étude en coût global permet de justifier ces choix.

La préfabrication, une piste pour réduire les coûts ?

(Question posée au colloque de retours d'expérience des Appels à Projets du 30/05/2013)

Sur le papier, dès que les bâtiments à construire ou à rénover sont tramés, il y a un intérêt économique évident à pré-fabriquer en atelier des ossatures bois, plutôt que d'assembler une ossature depuis un échafaudage ou une nacelle... On peut également en attendre un gain de temps sur le chantier et un gain en qualité de réalisation.

Certaines opérations des Appels à Projets semblent démentir cette intuition, car à la consultation des entreprises la solution traditionnelle d'ossature réalisée in-situ depuis une nacelle s'est avérée moins chère.

Cependant, il semble que ce constat est amené à évoluer dans le temps, avec la structuration de l'offre de préfabrication. On voit déjà clairement cette tendance pour la construction de maisons à ossature bois. On peut s'attendre à ce que la préfabrication se répande progressivement en construction et en rénovation de bâtiments collectifs ou tertiaires.

5 Conclusion : bilan général

5.1 Leçons sur le fonctionnement de l'appel à projet

Pourquoi la Région a-t-elle fait évoluer les exigences de l'appel à projet entre 2006 et 2008 ?

La Région Bourgogne souhaitait que les Appels à Projets restent en pointe de la performance énergétique du bâtiment. Forte de l'expérience des appels à projets précédents, et sachant pouvoir compter sur la mobilisation des Maîtres d'ouvrage et la compétence des Maîtres d'œuvre, la Région a choisi de relever la barre pour poursuivre la montée en force de la dynamique des bâtiments très performants, en soutenant des projets très ambitieux et en avance sur leur temps.

Cette volonté a nécessité de se doter d'une méthode alternative de calcul des performances :

- Les premiers appels à projet ont montré certaines limites du calcul RT 2005 sur lequel le niveau d'exigence énergétique était basé en grande partie. C'est en effet un calcul conventionnel, qui n'a pas vocation à être prédictif, et qui s'est avéré souvent trop éloigné de la réalité.
- En évoluant vers encore plus de performance est apparue la nécessité d'intégrer les usages non réglementaires. En effet, les usages réglementaires (chauffage, climatisation, ECS, ventilation, éclairage) sont évidemment ceux sur lesquels nous avons le plus de moyens d'action au stade de la conception et de la réalisation. Mais dans le cas de bâtiments très performants, ces consommations deviennent minoritaires (voire § 0). La conception de bâtiments très performants (Passifs, Energie positive) nécessite donc une approche globale de toutes les consommations énergétiques, y compris l'électricité spécifique.

La méthode de calcul développée par Enertech permet d'apporter une solution à ces problèmes, tout en apportant des valeurs issues de nos campagnes de mesure, et le retour au calcul « d'ingénieur », ou l'utilisateur maîtrise parfaitement les entrées, intermédiaires de calcul et les sorties (au contraire de l'effet « boîte noire » du calcul réglementaire). Le Conseil Régional a donc basé les exigences de l'appel à projet 2008 sur cette méthode.

Y a-t-il eu des évolutions du suivi AMO ?

Certaines positions techniques de l'AMO étaient parfois trop rigides au début : il était nécessaire d'introduire plus de souplesse. Par exemple l'isolation du plancher bas n'est pas toujours possible en rénovation, notamment sur terre-plein. Des compromis ont ainsi pu être trouvés, par exemple l'isolation périphérique de la dalle basse et la mise en place de triple vitrage malgré l'isolation extérieure pour compenser les pertes par le plancher bas.

On peut également citer les exigences sur la régulation terminale : au début il était exigé un thermostat par pièce. Au vu de retours d'expérience de campagnes de mesure, et des prix constatés, cette exigence a été assouplie en faveur d'une régulation terminale par vanne et thermostat par logement (plus des robinets thermostatiques par pièce qui sont imposés par la Réglementation Thermique), pour les logements en ventilation double flux.

Ci-contre : régulation terminale performante en rénovation



Est-il toujours nécessaire de faire une STD sur chaque bâtiment ?

La STD est un outil de conception très important, et son rôle nous semble central dans la dynamique d'équipe (voir § 0).

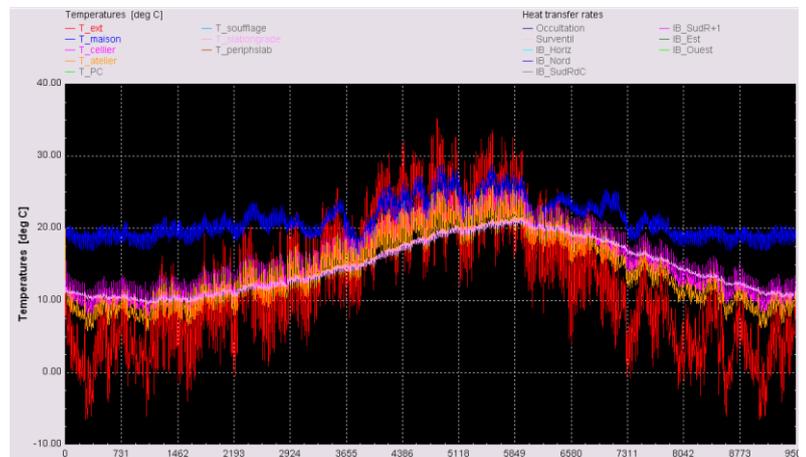
C'est cependant un outil lourd, qui demande du temps pour être réalisée. Aussi il n'est pas réaliste de réaliser un tel calcul sur toutes les opérations neuves et de rénovation, notamment de petite taille :

- pour la rénovation des logements, Enertech a développé les « Solutions Techniques de Référence », permettant de s'affranchir de ce calcul (voir p 70) ;
- pour les opérations neuves n'ayant pas d'autre ambition que de respecter la RT 2012, c'est le calcul réglementaire qui est utilisé pour valider la performance. Attention cependant, ne pas baser les estimations de charges sur ce calcul qui reste conventionnel, et il reste nécessaire de s'assurer par ailleurs du confort d'été ;
- pour les constructions et rénovations de logements, l'expérience des nombreuses STD suivies a permis de dégager des règles de conception sous la forme d'obligations de moyen pour assurer le confort d'été (explicitées p 30).

Ci-contre : courbes de températures obtenues par simulation thermique dynamique (hors AAP).

La STD reste aujourd'hui nécessaire :

- pour des bâtiments à usages atypiques, notamment en secteur tertiaire,
- pour des bâtiments visant une performance thermiquement particulière (Passifs, à Energie Positive, etc.),
- pour réaliser un calcul de charges réaliste,
- dans le cas où l'on souhaite déroger aux règles de conception concernant le confort d'été citées précédemment, notamment dans le cas des bâtiments fortement vitrés (surface de menuiseries représentant plus de 18% de la SHAB / SU).



Quels sont les retours des équipes ?

Points positifs

L'accompagnement semble avoir été très bien accueilli par les Maîtres d'ouvrage avec qui nous avons pu discuter à la fin de l'opération. L'appui de l'AMO sur les points techniques est jugé pertinent et utile. La dynamique de travail collectif Maîtrise d'ouvrage / Maîtrise d'œuvre / AMO / Région a été globalement appréciée.

Les réunions d'information des entreprises sur l'étanchéité à l'air en phase chantier réalisées par Dominique Marie ont été très appréciées.

La visite d'assistance à la Mise au point a été également très bien accueillie par les Maîtres d'ouvrage qui en ont bénéficié, pour l'assistance pratique à la résolution de certains dysfonctionnements.

La plupart des Maîtres d'ouvrage avec qui nous en avons discuté ont jugé la subvention bien dimensionnée. Elle a permis d'être le déclencheur pour « passer à un cran au-dessus » en matière de performance.

Nous avons eu le plaisir de discuter avec certains Maîtres d'œuvre après l'Appel à Projets, qui nous ont indiqué qu'ils poursuivent la démarche de conception basse consommation que nous avons initiée ensemble sur l'ensemble de leurs nouveaux projets hors du cadre de l'Appel à Projets. C'est sans doute notre plus grande satisfaction : **l'appel à projet a bien eu un effet pérenne sur le secteur du bâtiment durable en région Bourgogne, qui se poursuivra même une fois les Appels à Projets clos.**

Points négatifs

Certaines équipes ont pu objecter que **la subvention ne couvrait pas totalement le « surcoût » de la basse consommation**. Outre le fait que cette affirmation était parfois erronée (il est tout à fait possible de réaliser des bâtiments BBC voire Passifs sans surcoût), il faut souligner le fait qu'il ne s'agit pas de surcoût mais bien de surinvestissement. Or c'est bien le Maître d'ouvrage et non la Région qui bénéficiera des économies d'énergie réalisées par rapport à un bâtiment classique, sans parler de la survaleur verte. **Il n'est donc pas du tout légitime que les porteurs de projet se donne pour objectif de réaliser une « marge » entre la subvention et le surinvestissement, tout en bénéficiant à la sortie d'un bâtiment plus économe !**

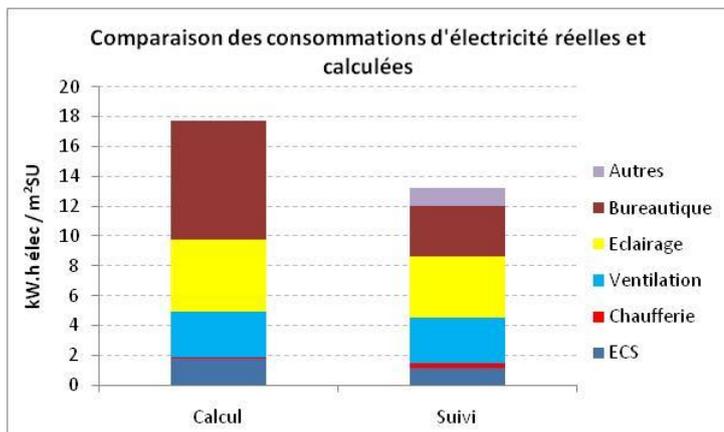
On souligne également que certaines opérations ont participé aux Appels à Projets sans toucher de subvention, simplement pour bénéficier de l'accompagnement technique.

Autre critique formulée : la fin de l'accompagnement, et notamment **le délai de paiement du solde de la subvention a été jugé trop long** par certains Maîtres d'ouvrage.

Il faut préciser que le paiement du solde de la subvention a été conditionné à la réalisation de la visite de Mise au point pour les premières opérations qui en ont bénéficié, ce qui a en effet retardé le paiement du solde. Ceci a été résolu par la suite en permettant le paiement du solde sur attestation de l'AMO suite aux visites de chantier (et réception des réponses aux questions bloquantes le cas échéant). La visite de Mise au point était alors réalisée, le cas échéant, au titre de service rendu au Maître d'ouvrage, et non comme une étape de validation.

Ce qui est au final assez logique, car la subvention vise à récompenser l'investissement dans du matériel performant, ce qui peut se valider à la Réception. Les réglages, objets de la visite de Mise au point, sont au contraire parfois éphémères (malheureusement). Il semble donc inapproprié de baser la validation d'une subvention sur un élément de réglage.

Suggestions



En complément du suivi proposé dans le cadre des Appels à Projets, certains Maîtres d'ouvrages se sont dits intéressés dans un **suivi des consommations de l'opération dans le temps**, afin de suivre l'évolution du bilan énergétique sur plusieurs années, et de continuer à améliorer les installations.

Ci-contre : bilan réalisé spontanément par le BE d'une opération tertiaire, un an après réception.

Pourquoi la dynamique n'a pas fonctionné parfaitement avec certaines équipes ?

La Région et son AMO ont eu parfois le sentiment que certains de Maîtres d'ouvrage (une très faible minorité) étaient simplement venus chercher une subvention dans ces Appels à Projets, sans réelle implication dans la démarche de performance. Dans ces cas, les objectifs de performance visés ont été fermement maintenus. C'est une question d'équité avec les équipes réellement engagés dans la démarche et avec les Maîtres d'ouvrage qui consentent un réel surinvestissement. Il a par ailleurs été clairement établi depuis le début qu'être lauréat d'un Appel à Projets n'est pas un engagement définitif, et qu'il était toujours possible d'en sortir.

Nous avons également pu constater qu'il n'est pas toujours facile de traiter un dossier technique et de conduire normalement l'accompagnement technique lorsque l'opération fait l'objet de pressions politiques diverses ne contribuant généralement pas à l'amélioration de la performance...

En ce qui concerne les Maîtres d'œuvre, certaines équipes n'ont pas été pleinement en phase avec la démarche de l'appel à projet. Nous avons cru identifier plusieurs raisons :

- La démarche de conception des bâtiments performants bouscule parfois des habitudes de travail, ainsi que la façon de travailler en équipe au sein de la maîtrise d'œuvre ;
- Certains outils (notamment la STD), n'étaient pas toujours maîtrisés, notamment dans les premiers Appels à Projets, ce qui a nécessité un temps de formation ;
- Les honoraires de la Maîtrise d'œuvre, notamment du bureau d'étude, n'étaient pas toujours adaptés au travail supplémentaire que demandent à la fois la conception de bâtiments performants, et l'indispensable présence du BE sur les chantiers ;
- La mise au point des pièces écrites était parfois complexifiée par le fait que le BE n'avait pas la mission EXE. Or la performance se joue souvent sur des dimensionnements adéquats, que l'AMO se devait d'analyser, mais sur lesquels le BE n'avait pas toujours la main (l'EXE étant réalisée par l'entreprise après signature des marchés).

Quelle est la valeur ajoutée d'un AMO sur un tel appel à projet ?

La mission d'Enertech a été bien plus qu'une AMO classique. Il ne s'agissait pas de valider a posteriori un dossier établi par la Maîtrise d'œuvre. Le travail de l'AMO a été d'accompagner la conception, puis la réalisation, parfois jusqu'à la mise au point des installations.

Dans un monde parfait, la mission de l'AMO aurait été inutile. Mais les bâtiments à basse consommation sont un sujet encore innovant, et qui l'étaient encore plus en 2006. De plus, la démarche de performance subit de plein fouet le manque de « démarche qualité », qui caractérise malheureusement la filière du bâtiment (par rapport à l'industrie par exemple). Ce manque de qualité, qui ne se voyait pas trop sur des bâtiments peu performants, deviennent criant sur des bâtiments dont on attend des performances, et que l'on évalue par la mesure ou tout simplement en regardant les factures.



Visite sur chantier

Ainsi la dynamique des Appels à Projets, et en particulier le travail de l'AMO, a contribué à la formation des acteurs du bâtiment sur des thématiques nouvelles. L'expérience et le regard critique de l'AMO, apportant un regard extérieur à l'équipe de Maîtrise d'œuvre, a permis d'éviter quelques erreurs de conception, de proposer des solutions pour améliorer la performance, d'identifier certains défauts à la réalisation (même si un ou deux visites était largement insuffisant pour tout voir), et de contribuer à résoudre certains dysfonctionnement après réception.

Globalement, l'accompagnement technique de l'AMO a permis d'aborder des sujets techniques nouveaux, de proposer des solutions performantes, et d'apporter une démarche rigoureuse de suivi. Ce qui a permis d'**alimenter une dynamique collective vers la performance du bâtiment.**

Si c'était à refaire ?

Les Maîtres d'ouvrages interrogés ont généralement signifié leur intérêt pour participer à un autre Appel à Projets s'il était lancé.

Aujourd'hui la Région Bourgogne souhaite réorienter le soutien à la performance du bâtiment vers le secteur de la Rénovation. En effet, la rénovation des bâtiments existants reste le principal gisement d'économies d'énergies, par ailleurs couplé aux problématiques de précarité énergétique.

5.2 Bilan de l'appel à projet

Un réel succès

- ✓ 160 projets suivis au total.
- ✓ **Des réalisations exemplaires** : 21 rénovations facteur 4, 45 opérations BBC, 35 bâtiments Passif, et 8 bâtiments à Energie Positive.
- ✓ Un ensemble d'**Appels à Projets unique en France** par son ampleur, son encadrement, le degré de son suivi et le niveau de performance atteint.
- ✓ Le développement d'une **solide compétence** des Maîtres d'œuvre et des entreprises en Bourgogne.
- ✓ Un bilan environnemental significatif : **1 750 000 MW.h d'énergie primaire** économisée sur 60 ans, et **178 000 tonnes d'équivalent CO₂** évitées.



Une aventure humaine

- ✓ Un travail avec 80 Maîtres d'ouvrage différents (dont 34 collectivités territoriales, 5 bailleurs sociaux, 4 autres bailleurs, 22 particuliers, 2 SCI, et 13 entreprises ou autres structures).
- ✓ Plus de 400 réunions de conception, plus de 200 visites de chantier.
- ✓ Pour l'AMO, une formidable expérience à la fois technique et humaine, pendant laquelle il a appris tout autant qu'il a partagé.
- ✓ Une **dynamique qui se poursuit après la fin des Appels à Projets**, à travers des acteurs mobilisés et formés.



Annexes

Annexe 1

Cahier des charges de Simulation Thermique Dynamique,
réalisé par Enertech pour les Appels à Projets de la Région Bourgogne.

Annexe 2

Méthode de calcul physique des consommations tous usages
réalisé par Enertech pour les Appels à Projets de la Région Bourgogne.