



Etude d'un système combiné de ventilation et de chauffage au bois dans les bâtiments à basse consommation d'énergie

Pierre Peigné

► To cite this version:

Pierre Peigné. Etude d'un système combiné de ventilation et de chauffage au bois dans les bâtiments à basse consommation d'énergie. Autre. Université de La Rochelle, 2012. Français. ⟨NNT : 2012LAROS357⟩. ⟨tel-00816015⟩

HAL Id: tel-00816015

<https://theses.hal.science/tel-00816015v1>

Submitted on 19 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur

École Doctorale : **Sciences pour l'Environnement Gay Lussac**

Laboratoire : **LEPTIAB**

THÈSE

présentée par

Pierre PEIGNÉ

pour l'obtention du grade de : **Docteur de l'Université de La Rochelle**

Discipline : **Génie Civil** Spécialité : **Énergétique**

Étude d'un système combiné de ventilation et de chauffage au bois dans les bâtiments à basse consommation d'énergie

Directeur de thèse : **Christian INARD**

Soutenue le 27 février 2012 devant le jury composé de :

Francis ALLARD	Professeur, Université de La Rochelle	Examineur
Lionel DRUETTE	Directeur du laboratoire CERIC, Groupe Pujoulat	Examineur
Gilles FRAISSE	Professeur, Université de Savoie	Rapporteur
Christian INARD	Professeur, Université de La Rochelle	Examineur
Christophe MÉNÉZO	Professeur, INSA de Lyon	Rapporteur
Joseph VIRGONE	Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1	Examineur

Au-delà de la prise de conscience, s'unir pour des choix responsables

L'humanité doit faire face à un défi vertigineux qui conditionne pourtant sa survie : Comment assurer à l'échelle de la planète, un développement économique et social équitable, tout en préservant l'environnement ?

Depuis plusieurs décennies, les scientifiques nous alertent sur l'influence de plus en plus importante des activités humaines sur les équilibres de l'environnement terrestre : effet de serre additionnel, destruction de la couche d'ozone, déforestation massive, urbanisation débridée, désastres industriels, catastrophes environnementales liées à la production, au transport ou à l'exploitation de l'énergie, mais aussi surexploitation des ressources fossiles, minières, agricoles et maritimes, pollution des sols, de l'air et de l'eau, qui affectent des territoires bien au-delà des lieux d'origine des émissions.

Par leur amplitude et leur rapidité, lorsqu'elles sont comparées aux cycles naturels de la Terre, ces perturbations mettent en danger la survie même de nos civilisations. C'est alors tout l'enjeu du développement durable, qui implique un changement progressif mais décisif de nos modes de vie et de consommation, ainsi qu'une volonté d'action partagée par le plus grand nombre. En effet, nous sommes tous interdépendants et personne ne saurait être exclu de cette dynamique sans en affecter les chances de réussite.

Aujourd'hui, les progrès des communications multiplient de façon prodigieuse l'accès aux savoirs et aux autres. Il n'est donc plus possible de se cacher derrière les traits de l'ignorance. En revanche, de nouveaux moyens de vivre ensemble se dessinent et une transition s'opère peu à peu, depuis une période de pleine croissance et de consommation vers une période de pleine conscience et de communication. Doit-on alors craindre de nouvelles formes de conflit à venir ou espérer de nouvelles opportunités à saisir ? Tout dépend du regard que chacun portera sur l'autre.

En effet, c'est dans la capacité de chacun à voir en l'autre non un adversaire à dominer mais une source où s'abreuver, et à prendre ensemble rapidement les décisions qui s'imposent pour s'engager dans un développement durable, équitable et responsable, que dépend pour beaucoup l'avenir des générations futures.

Pierre PEIGNÉ

Librement inspiré de l'ouvrage de
Roger CANS et Benoît HOPQUIN
POUR QUE VIVE LA TERRE, 2003

« Nous n'héritons pas de la terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants. »

Antoine DE SAINT-EXUPÉRY

Terre des Hommes, 1939

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé dans sa majeure partie au sein du Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment (LEPTIAB) de l'Université de La Rochelle, devenu depuis le 1^{er} janvier 2012 le Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE). Les essais expérimentaux en laboratoire ont quant à eux été menés en collaboration avec l'industriel POUJOLAT dans les locaux du Centre d'Essais et de Recherche des Industries de la Cheminée (CERIC) à Saint-Symphorien près de Niort.

Je tiens tout d'abord à remercier les responsables de ces deux structures, Francis ALLARD au LEPTIAB et Lionel DRUETTE au CERIC, pour m'avoir accueilli et accordé leur confiance tout au long de ce travail. Ces remerciements s'étendent ensuite naturellement à l'ensemble des personnels administratifs et techniques qui animent ces structures et dont j'ai eu plaisir à croiser la route.

Pour m'avoir suivi, conseillé et encouragé, j'exprime toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Christian INARD et au responsable industriel du projet, Lionel DRUETTE.

Je tiens à associer à ces remerciements Christophe MÉNÉZO et Gilles FRAISSE, qui m'ont fait l'honneur d'expertiser ce travail de thèse en tant que rapporteurs, ainsi que Joseph VIRGONE, Lionel DRUETTE et Francis ALLARD, qui m'ont également fait l'honneur de participer au jury de ces travaux.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent ensuite à toute l'équipe du CERIC avec un clin d'œil appuyé à Pierre, Jérôme, Anne-Sandrine, Julien, Francis et Nicolas. Merci aussi à Laurence ROBERT pour son soutien précieux lors des premières années de ce projet et pour sa bienveillance en toute occasion.

À tous les membres du LEPTIAB, permanents et doctorants, avec lesquels j'ai pu échanger, me détendre et apprendre, souvent autour d'un café... je vous remercie et je vous souhaite une bonne route à tous, avec l'espoir de vous retrouver tantôt par hasard, tantôt par vouloir... J'associe bien évidemment à ces remerciements, l'ensemble des personnes avec lesquelles j'ai eu l'occasion de travailler, notamment Oliver et Michel qui m'ont guidé dans les réalisations expérimentales.

À mes collègues et amis, Marx et Adrien, merci pour vos épaules solides ! Certes, une thèse est un projet personnel, mais elle n'avait de sens pour moi que si je pouvais la partager. Merci de m'avoir accompagné sur ce chapitre de vie, tant au niveau professionnel que personnel... la suite de l'histoire nous appartient et j'ai hâte d'en écrire de nouvelles pages à vos côtés. Merci !

Enfin et surtout, toute ma gratitude s'adresse à ceux qui m'ont toujours soutenu, accompagné et conseillé alors que j'étais parfois en proie à de nombreuses interrogations. Merci.

À ma famille, mes piliers,

À toi Laurence, ma moitié,

Et à l'avenir... au(x) bébé(s) !

Abstract

This work is devoted to the study and development of an innovative wood-based air-heating system for energy-efficient dwellings, which are expected to become the building reference in France from 2015 onwards. As these kinds of homes are highly insulated and particularly airtight, heating requirements are very low and may be covered by a renewable energy source, such as wood energy. In addition, efficient ventilation is absolutely required to ensure indoor air quality and may even sometimes be used as the only way to provide heat into the various rooms of the house. In this context, the system presented in this study aims to combine advantages of a low power wood-burning appliance, as a wood-pellet stove, and those of a mechanical ventilation heat-recovery unit, thanks to a heat exchanger integrated into the chimney of the pellet stove and connected to the ventilation air supply network. Developed in partnership with POUJOULAT, a metallic chimneys manufacturer, this new heat exchanger recovers a part of the heat from flue gases and enables to warm up the fresh air distributed in each living zone of the house, even the most remote of the wood heating device. After defining the best coupling configuration to ensure the proper behaviour of the system, as well as both safety and comfort of the occupants, performances of several heat exchanger prototypes are characterized experimentally. The results from tests in laboratory are then used to guide prototypes development and they highlight the need to work with a room-sealed wood-pellet stove. Moreover, a mathematical model is developed to predict the performances of the latest prototype of triple concentric tube heat exchanger with no insulation at the outer surface. Then, the model validation is obtained following the good agreement between calculated results and those measured during the laboratory tests. The combined system is then installed in two energy-efficient dwellings near Poitiers. Operating temperatures and energy consumptions collected during the first heating season show the good reliability of the combined system, its limitations and its conditions of acceptance by the occupants, whose behaviour is pointed out as a major factor in reducing energy consumptions.

Keywords: low energy building, combined system, air heating, heat-recovery ventilation, wood-pellet stove, triple concentric tube heat exchanger, experiments, mathematical model.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude et le développement d'un système innovant de ventilation et de chauffage au bois dans les habitations à basse consommation d'énergie, qui sont appelées à devenir la référence constructive en France dès 2015. Dans ces habitations fortement isolées et particulièrement étanches à l'air, les besoins de chauffage sont très faibles et peuvent être couverts par une source de chaleur d'origine renouvelable, telle que le bois énergie. En outre, l'utilisation d'une ventilation performante s'impose comme étant un critère essentiel pour assurer la bonne qualité de l'air intérieur et peut même devenir l'unique vecteur de chauffage en apportant l'appoint de chaleur sur l'air insufflé dans les différentes pièces de l'habitation. Le système présenté dans cette étude propose ainsi de combiner les avantages d'un appareil de chauffage au bois de petite puissance, ici un poêle à granulés de bois, et ceux d'une ventilation à récupération de chaleur sur l'air extrait, grâce à un conduit échangeur intégré à la cheminée du poêle et relié au réseau de soufflage de la ventilation. Développé en partenariat avec l'industriel POUJOULAT, spécialisé dans la fabrication de conduits de cheminée métalliques, ce conduit échangeur permet de récupérer sur l'air neuf une partie de la chaleur initialement perdue par les fumées et de la distribuer dans toutes des zones de vie de l'habitation, même les plus éloignées de l'appareil au bois. Après avoir défini la configuration de couplage à adopter pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble et garantir à la fois la sécurité et le confort des occupants, les performances de plusieurs prototypes de conduit échangeur sont caractérisées expérimentalement. Les résultats obtenus lors des essais en laboratoire permettent alors d'orienter l'évolution des prochains prototypes et de souligner la nécessité de travailler avec un poêle à granulés de bois dont le cycle de combustion est étanche. Un modèle mathématique est également développé pour prédire les performances du dernier prototype de conduit échangeur à triple paroi non isolé sur sa surface extérieure et sa validation est obtenue suite au bon accord entre les résultats calculés et ceux mesurés lors des essais. L'ensemble du système combiné est ensuite installé dans deux habitations à basse consommation d'énergie situées près de Poitiers. L'exploitation des températures et des consommations recueillies pendant la première saison de chauffe montre la bonne tenue du système combiné, ses limites, ainsi que ses conditions d'appropriation par les occupants, dont le comportement apparaît jouer un rôle prédominant dans la réduction des consommations énergétiques.

Mots clés : bâtiment basse consommation d'énergie, système combiné, chauffage à air, ventilation à récupération de chaleur, poêle à granulés de bois, échangeur de chaleur à triple tube concentrique, expérimentations, modèle mathématique.

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
ABSTRACT	II
RÉSUMÉ.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX	X
NOMENCLATURE	XII
 Introduction.....	 1
 Chapitre 1 : Chauffage au bois et vecteur air dans les BBC	 5
1.1. ÉNERGIE, ENVIRONNEMENT ET BÂTIMENT	6
1.1.1. Enjeux énergétiques et environnementaux.....	6
1.1.2. Engagements internationaux et nationaux.....	8
1.1.3. Évolutions réglementaires récentes	11
1.1.4. Influence du secteur du bâtiment.....	15
1.2. MUTATION DU SECTEUR DU BÂTIMENT.....	19
1.2.1. Dispositions réglementaires	19
1.2.2. Prévention des risques sanitaires.....	24
1.2.3. Incitations financières	27
1.2.4. Information, formation et innovation	28
1.3. BÂTIMENTS À BASSE CONSOMMATION (BBC).....	31
1.3.1. Point sur les principales appellations	32
1.3.2. Caractéristiques générales des BBC.....	41
1.3.3. Solutions techniques associées.....	43
1.3.4. Procédure de choix liée au chauffage.....	44
1.4. CHAUFFAGE AU BOIS	46
1.4.1. Potentiel de la ressource bois	46
1.4.2. Chauffage domestique au bois	49
1.4.3. Mesures favorables de développement.....	55
1.5. VECTEUR AIR	60
1.5.1. Rôle et importance de la ventilation.....	60
1.5.2. Description et condition d'application du chauffage à air.....	69
1.5.3. Systèmes de récupération et de distribution d'air chaud	73
 Chapitre 2 : Conduit échangeur à triple paroi - prototypes et modèle	 85
2.1. CONDUIT ÉCHANGEUR POUR POÊLE À GRANULÉS DE BOIS	86
2.1.1. Phase préliminaire du projet.....	86
2.1.2. Cahier des charges du conduit échangeur	91
2.1.3. Développement de prototypes	94
2.1.4. Caractérisation aéraulique	98

2.2. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION EXPÉRIMENTALE.....	100
2.2.1. Protocole et méthodologie.....	100
2.2.2. Principaux composants du banc d'essai	107
2.2.3. Métrologie et instrumentation	110
2.2.4. Problématiques rencontrées.....	118
2.3. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES PROTOTYPES.....	121
2.3.1. Résultats des essais sur le CEDP-PI.....	122
2.3.2. Résultats des essais sur le CETP-PI	126
2.3.3. Essai préliminaire sur le système combiné.....	130
2.3.4. Voies d'optimisation du système et des essais	132
2.4. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE MATHÉMATIQUE	135
2.4.1. Analyse théorique.....	136
2.4.2. Étude paramétrique	146
Chapitre 3 : Essais du système combiné en laboratoire et sur site	155
3.1. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION EN LABORATOIRE.....	156
3.1.1. Protocole et méthodologie.....	157
3.1.2. Principaux composants du banc d'essai	160
3.1.3. Métrologie et instrumentation	167
3.2. RÉSULTATS DES MESURES EN LABORATOIRE.....	172
3.2.1. Analyses effectuées	172
3.2.2. CETP-NI composé d'une seule partie	176
3.2.3. CETP-NI composé de deux parties	182
3.2.4. Éléments de comparaison.....	189
3.2.5. Éléments de conclusion.....	191
3.3. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION SUR SITE.....	193
3.3.1. Présentation du projet Vecteur Air Bois.....	193
3.3.2. Installation du système combiné sur site.....	195
3.3.3. Dispositifs de mesure pour le suivi des logements.....	203
3.3.4. Accompagnement des locataires	206
3.4. RÉSULTATS DES MESURES SUR SITE.....	207
3.4.1. Analyse de la qualité de l'ambiance intérieure	207
3.4.2. Analyse des consommations énergétiques	210
3.4.3. Analyse de l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air	217
3.4.4. Analyse du taux de CO dans l'air de ventilation en aval du conduit échangeur	226
Conclusion et Perspectives	231
Bibliographie	237
Annexes	245

Liste des figures

Figure 1.1 : Réserves prouvées d'énergie non renouvelable en année	6
Figure 1.2 : Consommation moyenne d'énergie primaire par habitant et par an	7
Figure 1.3 : Représentation schématique du développement durable	8
Figure 1.4 : Projection d'émissions de GES en France à l'horizon 2020.....	9
Figure 1.5 : Évolution programmée de la consommation énergétique des bâtiments en France.....	10
Figure 1.6 : Répartition des consommations énergétiques finales dans le résidentiel par usage.....	17
Figure 1.7 : Répartition des consommations énergétiques finales dans le résidentiel par type d'énergie	18
Figure 1.8 : Représentation schématique des 3 exigences de la RT 2012 pour un bâtiment neuf.....	20
Figure 1.9 : Répartition schématique des consommations par usage dans le résidentiel RT 2012	20
Figure 1.10 : Feuille de route de la réglementation énergétique du bâtiment neuf en France	21
Figure 1.11 : Étiquettes « énergie » et « climat » attribuées dans le cadre du DPE	23
Figure 1.12 : Étiquette santé environnementale pour les produits de construction et de décoration.....	25
Figure 1.13 : Vue d'un détecteur avertisseur autonome de fumée	26
Figure 1.14 : Identification du « réseau inter-clusters » à l'échelle nationale	29
Figure 1.15 : Identification du projet de réseau national de « plateformes bâtiment énergie ».....	30
Figure 1.16 : Principe du test d'étanchéité à l'air par la méthode de la porte soufflante	33
Figure 1.17 : Démarche globale du scénario Négawatt.....	41
Figure 1.18 : Choix du vecteur, de la source et du système énergétique de chauffage pour un BBC	44
Figure 1.19 : Taux de boisement de la France par département en 2009	46
Figure 1.20 : Cycle du carbone pour la ressource bois.....	47
Figure 1.21 : Gisement énergétique issu des rémanents de l'exploitation forestière en 2004.....	49
Figure 1.22 : Vues des différentes formes du combustible bois énergie	50
Figure 1.23 : Vues des différents appareils indépendants de chauffage au bois	52
Figure 1.24 : Vue du logo Qualibois attribué aux professionnels qualifiés du secteur	56
Figure 1.25 : Vue du nouvel étiquetage étoilé du label Flamme Verte	57
Figure 1.26 : Schéma de principe et vue de la solution combinée Chauffage-ECS-Bois-Solaire OptiBioSol	59
Figure 1.27 : Principe de la ventilation par balayage dans l'habitat.....	64
Figure 1.28 : Principe de la ventilation par pièces séparées dans l'habitat	64
Figure 1.29 : Principe de la ventilation par balayage partiel dans l'habitat	65
Figure 1.30 : Principe des quatre systèmes de ventilation selon le type d'admission et d'évacuation d'air.....	66
Figure 1.31 : Champ de température créé par différents émetteurs de chaleur	69
Figure 1.32 : Stratégies solaires passives de rafraîchissement et de chauffage de l'air	73
Figure 1.33 : Schémas de fonctionnement de deux centrales VMC-DF à récupération de chaleur	74
Figure 1.34 : Fonctionnement d'un puits enterré combiné à une récupération de chaleur sur l'air extrait	76
Figure 1.35 : Vues d'un système compact combinant une VMC-DF, une PAC et un ballon d'ECS.....	77
Figure 1.36 : Implantation générale et représentation d'un SRDAC fonctionnant en aspiration	78

Figure 1.37 : Vues des SRDAC à pulsion pour inserts et poêles à bûches proposées par POUJOULAT	79
Figure 1.38 : Vue de la solution cheminée à « Technologie Multi-Énergie » proposée par Fondis.....	80
Figure 2.1 : Schémas cotés en mm des deux versions de conduit échangeur testées avec un insert à bûches	87
Figure 2.2 : Vues des essais des deux versions de conduit échangeur testées avec un insert à bûches.....	88
Figure 2.3 : Évolution des températures des fumées et de l'air lors des essais avec un insert à bûches	89
Figure 2.4 : Vue d'un élément de conduit concentrique de la gamme DUALIS PGI	90
Figure 2.5 : Schémas de couplage entre le conduit échangeur et différents systèmes de ventilation.....	92
Figure 2.6 : Vue et schéma du premier prototype de conduit échangeur à triple paroi.....	94
Figure 2.7 : Vue des nouveaux prototypes de conduit échangeur à triple paroi.....	96
Figure 2.8 : Représentation du passage des différents fluides au sein du prototype n°2 de CETP	97
Figure 2.9 : Schéma du banc d'essai des pertes de charge sur l'air de ventilation des CETP.....	98
Figure 2.10 : Courbes des pertes de charge sur l'air de ventilation des CETP.....	98
Figure 2.11 : Courbe des pertes de charge sur l'air de combustion du prototype n°2	99
Figure 2.12 : Schéma du banc de caractérisation du CEDP-PI n°2.....	102
Figure 2.13 : Schéma du banc de caractérisation du CETP-PI n°2	103
Figure 2.14 : Variation de la masse volumique de l'air sec entre 250 K et 400 K.....	105
Figure 2.15 : Variation de la chaleur massique de l'air sec entre 250 K et 400 K	106
Figure 2.16 : Vue du poêle à granulés LISA du fabricant ECOTECK	107
Figure 2.17 : Vue du fonctionnement du poêle à granulés LISA	108
Figure 2.18 : Vues de l'isolation du conduit échangeur et de l'association en série des ventilateurs	109
Figure 2.19 : Vue des capteurs de vitesse à moulinet HÖNTZSCH	110
Figure 2.20 : Vue du transmetteur de vitesse à fil chaud TSI	111
Figure 2.21 : Principe de fonctionnement d'un thermocouple	112
Figure 2.22 : Vue du matériel utilisé pour l'étalonnage des capteurs de température.....	114
Figure 2.23 : Vue du module principal de la centrale CR1000 et d'un multiplexeur.....	114
Figure 2.24 : Vue de l'analyseur de combustion portable TESTO 330-2	115
Figure 2.25 : Positionnement des thermocouples dans les sections de passage des 3 fluides	116
Figure 2.26 : Vue du banc de caractérisation thermique des prototypes de conduit échangeur	117
Figure 2.27 : Évolution du débit massique des fumées et de l'air de combustion (LISA raccordé)	118
Figure 2.28 : Vue du climatiseur mobile monobloc et de son caisson d'installation	120
Figure 2.29 : Puissances échangées au sein du conduit échangeur (CEDP-PI).....	122
Figure 2.30 : Puissance disponible sur les fumées en entrée du conduit échangeur (CEDP-PI).....	123
Figure 2.31 : Efficacité de l'échange au sein du conduit échangeur (CEDP-PI).....	124
Figure 2.32 : Puissance maximum récupérable au sein du conduit échangeur (CEDP-PI).....	124
Figure 2.33 : Caractéristique globale de l'échange entre les fumées et l'air de ventilation (CEDP-PI).....	125
Figure 2.34 : Puissances échangées au sein du conduit échangeur (CETP-PI).....	126
Figure 2.35 : Puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-PI)	127
Figure 2.36 : Puissance maximum récupérable au sein du conduit échangeur (CETP-PI)	128

Figure 2.37 : Puissances maximum récupérables sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-PI)	128
Figure 2.38 : Efficacité de l'échange au sein du conduit échangeur (CETP-PI)	129
Figure 2.39 : Schémas des deux propositions d'allongement du conduit échangeur à triple paroi	133
Figure 2.40 : Exemples de solution d'optimisation de l'échange convectif à l'intérieur d'un tube	134
Figure 2.41 : Représentation schématique du CETP-NI	135
Figure 2.42 : Représentation schématique du modèle physique de CETP-NI	137
Figure 2.43 : Schéma électrique analogique des transferts de chaleur au sein du CETP-NI	138
Figure 2.44 : Distribution des températures de chaque fluide le long du CETP-NI et PI ($L = 1,5$ m)	146
Figure 2.45: Bilan des puissances échangées pour les trois modèles de CETP ($L = 1,5$ m)	147
Figure 2.46 : Distribution des températures le long du CETP-NI et PI ($L = 10$ m)	148
Figure 2.47: Efficacité de l'échange du CETP-NI en fonction du nombre d'ailettes et du paramètre z	149
Figure 2.48 : Efficacité de l'échange pour le modèle de CETP-PI	150
Figure 2.49 : Pourcentage de pertes extérieures pour le modèle de CETP-NI	152
Figure 3.1 : Schéma de principe du système combiné de ventilation et de chauffage au bois	156
Figure 3.2 : Vues et schéma du poêle à granulés à cycle de combustion étanche ELENA NEW	161
Figure 3.3 : Vues du circuit d'air de combustion et de l'écluse rotative des poêles ELENA	162
Figure 3.4 : Vue du test d'étanchéité mené au CERIC sur le prototype n°4 de CETP-NI	163
Figure 3.5 : Courbe de pertes de charge sur l'air de ventilation du prototype n°4 de CETP-NI	164
Figure 3.6 : Courbes de pertes de charge sur l'air de ventilation pour les 4 prototypes de CETP-NI	164
Figure 3.7 : Vue de la VMC double flux AKOR HR et détails de fonctionnement	165
Figure 3.8 : Vue des deux éléments de prise de mesure instrumentés sur les fumées	166
Figure 3.9 : Vues du réseau de ventilation lors des essais en laboratoire	166
Figure 3.10 : Schéma de principe du système combiné instrumenté	170
Figure 3.11 : Vues de quelques étapes de la réalisation du banc d'essai sur le système combiné	171
Figure 3.12 : Graphiques de mesures et de résultats de l'analyse de la combustion du poêle ELENA NEW	172
Figure 3.13 : Analyse granulométrique de l'air de ventilation en différents points du réseau de soufflage	174
Figure 3.14 : Quantités de CO et de CO ₂ contenues dans l'air de ventilation en aval du CETP	175
Figure 3.15 : Évolution de la température des fumées en entrée du CETP-NI n°3	176
Figure 3.16 : Puissances échangées au sein du CETP-NI n°3	177
Figure 3.17 : Évolution de la température de l'air de combustion le long de la cheminée (CETP-NI n°3)	178
Figure 3.18 : Puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°3)	178
Figure 3.19 : Puissances maximum récupérables sur l'air de ventilation (CETP-NI n°3)	179
Figure 3.20 : Puissances maximum récupérables sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°3)	179
Figure 3.21 : Efficacité de l'échange au sein du CETP-NI n°3	180
Figure 3.22 : Puissances transférées et maximum récupérables dans la VMC-DF (CETP-NI n°3)	181
Figure 3.23 : Évolution de la température des fumées en entrée du CETP-NI n°4	182
Figure 3.24 : Puissances échangées au sein du CETP n°4	183
Figure 3.25 : Évolution de la température de l'air de combustion le long de la cheminée (CETP-NI n°4)	185

Figure 3.26 : Puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°4).....	185
Figure 3.27 : Puissances maximum récupérables sur l'air de ventilation (CETP-NI n°4).....	186
Figure 3.28 : Puissances maximum récupérables sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°4).....	186
Figure 3.29 : Efficacité de l'échange au sein du CETP-NI n°4.....	187
Figure 3.30 : Puissances transférées et maximum récupérables dans la VMC-DF (CETP-NI n°4).....	188
Figure 3.31 : Vue du banc d'essai du système combiné équipé du CETP-NI n°4	192
Figure 3.32 : Plan de masse et vues 3D du projet de construction de 11 logements à Fontaine le Comte	193
Figure 3.33 : Repérage des trois logements de type T5 étudiés sur le plan de masse du projet	194
Figure 3.34 : Schéma de principe du système intégré de ventilation et de chauffage au bois	195
Figure 3.35 : Vue en coupe de l'encombrement du placard technique	196
Figure 3.36 : Vue d'un bâtiment et des différents composants du système combiné installé sur site	198
Figure 3.37 : Échelle d'appréciation de la perméabilité à l'air $Q_{4Pa-surf}$ en bâtiments collectifs	202
Figure 3.38 : Vues extérieures des trois logements étudiés lors du test d'étanchéité à l'air	202
Figure 3.39 : Description de l'implantation de la métrologie pour le suivi expérimental sur site.....	205
Figure 3.40 : Vue extérieure générale de la résidence Guy de Maupassant à Fontaine le Comte	207
Figure 3.41 : Suivi de la qualité de l'ambiance intérieure dans le salon du logement I en d'octobre 2010	207
Figure 3.42 : Détail de la consommation électrique du poêle à granulés du logement I au mois d'octobre	208
Figure 3.43 : Consommations électriques par poste dans les trois logements étudiés	211
Figure 3.44 : Poids de chaque poste de consommation électrique dans les trois logements étudiés.....	211
Figure 3.45 : Allure caractéristique de la puissance électrique consommée par le poêle à granulés	213
Figure 3.46 : Suivi de la puissance électrique consommée en veille par le poêle à granulés ELENA MINI.....	213
Figure 3.47 : Vue d'un pic de puissance électrique consommée par le poêle suite à un défaut d'extinction.....	214
Figure 3.48 : Suivi de la puissance électrique consommée par le poêle à granulés en fonctionnement.....	214
Figure 3.49 : Suivi représentatif de la puissance électrique consommée par la VMC-DF du logement I.....	215
Figure 3.50 : Suivi représentatif de la puissance électrique consommée par la VMC-DF du logement K	216
Figure 3.51 : Température et humidité relative de l'air extérieur sous abri	217
Figure 3.52 : Superposition des valeurs de la pression atmosphérique mesurées dans les trois logements	217
Figure 3.53 : Superposition des données mesurées dans le salon et les chambres de chaque logement	218
Figure 3.54 : Superposition de la température et de l'humidité relative dans le salon des trois logements	219
Figure 3.55 : Superposition de la température de l'air dans le salon des trois logements	219
Figure 3.56 : Écart d'humidité relative entre le salon (bleu foncé) et les chambres dans chaque logement	220
Figure 3.57 : Comparaison des températures dans les pièces principales des trois logements	221
Figure 3.58 : Détails des mesures relevées dans le logement J pendant la période d'inoccupation	223
Figure 3.59 : Vues des façades extérieures du logement J et identification des marques d'humidité	223
Figure 3.60 : Évolution de la température de l'air dans le local technique en bas de chaque logement	224
Figure 3.61 : Relevé des 3 enregistreurs EL-USB-CO300 entre le 01/10/2010 et le 31/12/2010	226
Figure 3.62 : Superposition des courbes de fonctionnement du poêle et de mesure de CO en aval du CETP	227
Figure 3.63 : Vue de l'illustration principale de l'abrégé du brevet déposé sur le CETP	232

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Performance thermique minimale de la paroi après travaux sur existant – $R_{\min}$ en $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$	22
Tableau 1.2 : Répartition des points par pôle et exigences pour l'attribution du label BBC Prioriterre	35
Tableau 1.3 : Inventaire des 14 cibles regroupées en 4 catégories de la démarche HQE.....	35
Tableau 1.4 : Répartition en 3 catégories des 7 thèmes de la certification H&E	36
Tableau 1.5 : Principales recommandations pour le respect des critères du standard Passivhaus.....	39
Tableau 1.6 : Inventaires des principales différences entre diverses appellations pour une habitation neuve	40
Tableau 1.7 : Inventaire des 6 grands principes de conception d'un BBC	42
Tableau 1.8 : Inventaires de quelques solutions techniques couramment rencontrées dans les BBC	43
Tableau 1.9 : Impact « énergétique » et « effet de serre » des solutions de chauffage domestique au bois	54
Tableau 1.10 : Exigences de rendement et d'émissions de CO et de poussières des appareils Flamme Verte	57
Tableau 1.11 : Inventaire des projets ADEME « chauffage domestique au bois énergie » entre 2005 et 2008....	58
Tableau 1.12 : Identification des principales fonctions de la ventilation	61
Tableau 1.13 : Valeurs des débits extraits dans chaque pièce de service, à atteindre simultanément ou non	62
Tableau 1.14 : Valeurs minimales du débit extrait total et en cuisine avec dispositifs individuels de réglage	62
Tableau 1.15 : Valeurs minimales du débit extrait total avec dispositifs à modulation automatique.....	62
Tableau 1.16 : Valeurs maximales acceptées des niveaux sonores émis par les appareils d'équipement	62
Tableau 1.17 : Analyse des conditions d'application du chauffage avec l'air de ventilation.....	71
Tableau 1.18 : Exemples de centrales VMC double flux à haute efficacité.....	75
Tableau 1.19 : Inventaire des systèmes de récupération et de distribution d'air chaud pour inserts	81
Tableau 2.1 : Puissance récupérée et efficacité de l'échange lors des essais avec un insert à bûches	89
Tableau 2.2 : Inventaire des critères et des solutions associées pour la conception du conduit échangeur.....	93
Tableau 2.3 : Ratios des diamètres équivalents pour les différents prototypes	96
Tableau 2.4 : Inventaire des mesures à réaliser lors des essais de caractérisation thermique	104
Tableau 2.5 : Taux moyen de dioxyde de carbone dans les fumées en fonction du régime du poêle LISA	106
Tableau 2.6 : Caractéristiques techniques du poêle à granulés LISA	107
Tableau 2.7 : Vue des différents éléments de conduit concentrique utilisés lors des essais.....	109
Tableau 2.8 : Caractéristiques techniques des capteurs de vitesse à moulinet HÖNTZSCH	110
Tableau 2.9 : Facteurs de profil des capteurs de vitesse à moulinet ZS25 HÖNTZSCH	111
Tableau 2.10 : Caractéristiques techniques des transmetteurs de vitesse TSI.....	112
Tableau 2.11 : Caractéristiques techniques de l'analyseur de combustion portable TESTO 330-2.....	115
Tableau 2.12 : Valeurs expérimentales du rapport $q_{m, AC} / q_{m, FC}$ en fonction du lieu de la prise d'air (LISA)	118
Tableau 2.13 : Valeurs théoriques du rapport $q_{m, AC} / q_{m, FC}$ en fonction du régime du poêle (LISA).....	119
Tableau 2.14 : Détermination du débit volumique d'air de combustion à simuler dans le conduit étanche	120
Tableau 2.15 : Défauts de bilan $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{\text{moy}}$ pour les essais à P1-V1 et P5-V5 (CEDP-PI).....	123
Tableau 2.16 : Écart relatif entre $U_{A_{\text{exp}}}$ et $U_{A_{\text{mod}}}$ pour les essais à P1-V1 et P5-V5 (CEDP-PI)	125
Tableau 2.17 : Défauts de bilan $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{\text{moy}}$ pour les essais à P1-V1 et P5-V5 (CETP-PI).....	129

Tableau 2.18 : Débits d'air de ventilation en fonction des réglages et de l'allure de la VMC-DF.....	131
Tableau 2.19 : Valeurs mesurées et calculées lors de l'essai préliminaire de couplage	131
Tableau 2.20 : Données d'entrée et températures de sortie des modèles de CETP-NI et PI (L = 1,5 m).....	146
Tableau 2.21 : Températures de sortie des modèles de CETP-NI et PI (L = 10 m)	149
Tableau 3.1 : Valeurs des débits d'air de ventilation retenus pour l'installation en laboratoire.....	158
Tableau 3.2 : Poêles à granulés de bois à cycle de combustion étanche visés par un ATec du CSTB.....	160
Tableau 3.3 : Caractéristiques techniques des poêles ELENA NEW et MINI (données constructeur)	161
Tableau 3.4 : Résultats du test d'étanchéité sur le poêle ELENA NEW du fabricant PALAZZETTI	162
Tableau 3.5 : Vue, plan et caractéristiques du prototype n°4 de conduit échangeur à triple paroi.....	163
Tableau 3.6 : Débits de fuite sous 200 Pa du prototype n°4 de conduit échangeur à triple paroi	163
Tableau 3.7 : Caractéristiques du capteur de vitesse à film chaud HÖNTZSCH.....	167
Tableau 3.8 : Facteurs de profil des capteurs de vitesse à film chaud HÖNTZSCH.....	167
Tableau 3.9 : Caractéristiques du capteur de CO et de CO ₂ SenseAir	168
Tableau 3.10 : Caractéristiques de l'analyseur granulométrique DEKATI.....	168
Tableau 3.11 : Caractéristiques du compteur de consommation électrique VOLTcraft	169
Tableau 3.12 : Mesures et résultats de l'analyse de la combustion du poêle ELENA NEW	173
Tableau 3.13 : Consommations électriques de la VMC-DF à haut rendement AKOR HR.....	173
Tableau 3.14 : Consommations électriques du poêle à granulés de bois ELENA NEW.....	173
Tableau 3.15 : Incertitudes sur les puissances échangées au niveau de chaque fluide (CETP-NI n°3)	177
Tableau 3.16 : Efficacité de l'échange au sein de la VMC-DF (système combiné avec le CETP-NI n°3).....	181
Tableau 3.17 : Incertitudes sur les puissances échangées au niveau de chaque fluide (CETP-NI n°4)	182
Tableau 3.18 : Températures d'air de combustion et d'air neuf de ventilation à la sortie du CETP-NI n°4.....	184
Tableau 3.19 : Efficacité de l'échange au sein de la VMC-DF (système combiné avec le CETP-NI n°4).....	188
Tableau 3.20 : Comparaison des puissances échangées pour tous les fluides au sein du système combiné	189
Tableau 3.21 : Comparaison des puissances récupérées par l'air au sein des CETP-NI n°3 et n°4.....	190
Tableau 3.22 : Comparaison des débits volumiques et massiques d'air de combustion prélevés par le poêle ...	190
Tableau 3.23 : Débits volumiques moyens de ventilation dans les différentes pièces du logement I	199
Tableau 3.24 : Débits volumiques moyens de ventilation dans les différentes pièces du logement J	200
Tableau 3.25 : Niveaux sonores moyens dans les pièces de vie pour différentes allures de la VMC-DF.....	201
Tableau 3.26 : Résultats des tests de perméabilité à l'air sur les logements de Fontaine le Comte	202
Tableau 3.27 : Principaux dispositifs de mesure utilisés dans les trois logements étudiés	203
Tableau 3.28 : Données attachées aux locataires des trois logements étudiés lors du suivi sur site	206
Tableau 3.29 : Résultats du suivi de la qualité de l'air intérieur dans le salon du logement I.....	208
Tableau 3.30 : Quantité de sacs de granulés de bois consommés par logement pendant l'hiver 2010-2011	210
Tableau 3.31 : Consommations électriques par poste dans les trois logements étudiés	211
Tableau 3.32 : Puissance électrique moyenne consommée par le poêle à granulés ELENA MINI sur site.....	212
Tableau 3.33 : Puissance électrique moyenne consommée par la VMC-DF AKOR HR sur site	215
Tableau 3.34 : Résultats des mesures de température dans le salon et les chambres de chaque logement	220

Nomenclature

A	aire d'échange	[m ²]
c_p	capacité calorifique massique à pression constante	[J/(kg.K)]
C	capacité thermique (ou débit enthalpique)	[J/K]
C_r	rapport adimensionnel de capacités thermiques	[-]
dA	élément de surface d'échange	[m ²]
$d\phi$	élément de flux thermique	[W]
dx	élément de discrétisation axiale	[m]
D	diamètre	[m]
D_h	diamètre hydraulique	[m]
D_{eq}	diamètre équivalent	[m]
e	épaisseur	[m]
E	efficacité	[%]
F	facteur de correction	[-]
F_F	facteur de forme	[-]
F_p	facteur de profil	[-]
h	coefficient d'échange par convection	[W/(m ² .K)]
h_r	coefficient d'échange par rayonnement	[W/(m ² .K)]
h_w	coefficient d'échange par conduction	[W/(m ² .K)]
j_{lin}	perte de charge linéaire	[Pa/m]
L	longueur	[m]
nb_f	nombre d'ailettes	[-]
N	rapport adimensionnel entre UA et C	[-]
Nu	nombre de Nusselt	[-]
NUT	nombre d'unité de transfert	[-]
P	périmètre	[m]
P_{abs}	pression absolue	[Pa]
Pr	nombre de Prandtl	[-]
q_a	pertes par chaleur sensible des fumées	[%]
q_b	pertes par chaleur latente des fumées	[%]
q_r	pertes par imbrulés solides	[%]
q_m	débit massique	[kg/s]
q_v	débit volumique	[m ³ /h]
r	rayon	[m]
R	résistance thermique	[K/W]
Ra	nombre de Rayleigh	[-]

Re	nombre de Reynolds	[-]
S	section de passage	[m ²]
T	température	[K]
U	coefficient d'échange global	[W/(m ² .K)]
UA	caractéristique globale de l'échange	[W/K]
v	vitesse	[m/s]
x	coordonnée de longueur axiale	[m]
X	coordonnée adimensionnelle de longueur axiale	[-]
z	rapport adimensionnel des capacités thermiques minimum et maximum	[-]

Symboles Grecs

ε	émissivité de surface	[-]
λ	conductivité thermique	[W/(m.K)]
λ_{EA}	excès d'air	[-]
λ_{lin}	coefficient de perte de charge linéaire	[-]
σ	constante de Stephan-Boltzmann (5,67.10 ⁻⁸)	[W/(m ² .K ⁴)]
$\sigma(CO)$	taux de monoxyde de carbone	[ppm]
$\sigma(CO_2)$	taux de dioxyde de carbone	[%]
$\sigma(O_2)$	taux de dioxygène	[%]
ϕ	flux thermique (ou puissance thermique)	[W]
η	rendement	[%]
η_f	efficacité d'une ailette	[%]
η_o	efficacité globale de la surface d'échange	[%]
θ	température adimensionnelle	[-]
ΔP	différence de pression	[Pa]
ΔT	différence de température	[K]
ΔT_{in}	nombre caractéristique homogène à une différence de température et ne dépendant que des températures d'entrée et des capacités thermiques des fluides	[K]
ΔT_{LM}	différence de température logarithmique moyenne	[K]

Indices et Exposants

0	air ambiant (autour de l'échangeur)
1	premier fluide (fumées de combustion)
2	deuxième fluide (air de ventilation)
3	troisième fluide (air de combustion)
a	tube intérieur
b	tube intermédiaire

Nomenclature

<i>c</i>	tube extérieur
<i>o</i>	outside (autour de l'échangeur)
<i>f</i>	ailette (fin)
<i>g</i>	granulés

in	entrée
out	sortie
int	intérieur
ext	extérieur

max	maximum
min	minimum
moy	moyenne

eq	équivalent(e)
cal	calculé(e)
exp	expérimental(e)
mod	modèle
tot	total(e)

Abréviations

FC	fumée de combustion
AC	air de combustion
AV	air de ventilation
AN	air neuf
AE	air extrait
OUT	outside (autour de l'échangeur)
PGB-CE	poêle à granulés de bois à combustion étanche
VMC-SF	ventilation mécanique contrôlée à simple flux
VMC-DF	ventilation mécanique contrôlée à double flux
CEDP	conduit échangeur à double paroi
CETP	conduit échangeur à triple paroi
PI	parfaitement isolé
NI	non isolé

Introduction

De nombreuses solutions techniques existent pour établir et maintenir une bonne qualité de l'ambiance à l'intérieur des espaces habités, depuis certaines considérations bioclimatiques souvent simples et gratuites, jusqu'à l'utilisation de systèmes de haute technicité parfois complexes et coûteux. Mais, aussi variées soient elles, ces solutions techniques présentent toutes en dénominateur commun l'objectif d'assurer le meilleur bien-être possible des occupants au sein de leur habitation.

L'histoire de la construction rappelle ainsi que l'homme est longtemps parvenu à tirer parti du climat et de solutions techniques simples pour améliorer son bien-être. Puis, recherchant toujours plus de confort et profitant d'un prix très faible de l'énergie, la multiplication des systèmes est devenue peu à peu la norme. Cependant, devant l'augmentation incessante des besoins et la raréfaction des ressources, de nouvelles formes de tensions économiques, géopolitiques et sociétales liées à l'énergie sont apparues. Les chocs pétroliers, les besoins énergétiques importants des pays en développement, la dépendance quasi-totale au pétrole du secteur des transports et l'influence reconnue des activités humaines sur l'accroissement du réchauffement climatique ont amené les pays développés à s'engager dans une diminution drastique de leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) et en conséquence de leur consommation d'énergie. Cet objectif ambitieux est traduit en France par le *Plan Climat* qui vise la réalisation du *Facteur 4*, c'est-à-dire la division par quatre des émissions de GES d'ici 2050. À ce titre, le *Grenelle Environnement*, initié en 2007, est entré dans sa phase active avec la promulgation des lois *Grenelle 1* le 3 août 2009, puis *Grenelle 2* le 12 juillet 2010, s'appuyant en particulier sur le *Plan Bâtiment Grenelle* pour piloter la mise en œuvre et le déploiement des mesures du programme de réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES dans le secteur du bâtiment.

En effet, le secteur du bâtiment est un domaine d'intervention privilégié, car il représente le premier poste de consommation d'énergie, avec plus de 40% de la facture de la France, mais c'est aussi l'une des principales sources d'émission de GES avec près de 20% de la production nationale. Ainsi, ce secteur révèle un fort potentiel d'économie d'énergie à court et à moyen termes, tant dans le résidentiel que dans le tertiaire et aussi bien en construction neuve qu'en réhabilitation, grâce à la limitation des déperditions au niveau de l'enveloppe du bâti et à l'utilisation de systèmes de production efficaces. En outre, de nombreuses possibilités d'intégration des énergies renouvelables y sont offertes. Ainsi, les interventions réalisées dans le secteur du bâtiment sont un moyen de répondre efficacement aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels, sans oublier les nombreux avantages sur le plan sociétal qu'implique toute amélioration des espaces habités.

Dans ce contexte, les projets de construction et de réhabilitation économes en énergie sont fortement encouragés dans divers pays, à travers des programmes d'opérations performantes comme *Passivhaus* en Allemagne, *Minergie* en Suisse, *Zero Energy Homes* aux États-Unis ou encore *BBC Effinergie* en France. Il existe aussi des programmes de recherche d'envergure internationale qui tendent à préciser, à tester et à diffuser les solutions techniques permettant de généraliser la réalisation de bâtiments à haute efficacité énergétique sous différents climats. Ainsi, bien que ces bâtiments présentent parfois des caractéristiques très différentes, ils peuvent pourtant être regroupés sous le terme commun de bâtiment à basse consommation d'énergie (BBC), car ils sollicitent tous un même triptyque de solutions techniques, composé d'une orientation favorable aux apports solaires passifs, d'une isolation thermique extrêmement renforcée et d'une très forte étanchéité à l'air de l'enveloppe. L'installation d'un système de ventilation performant y devient alors la seule nécessité pour assurer la pérennité de l'ouvrage ainsi qu'une bonne qualité de l'air intérieur.

Les constructions de type BBC privilégient ensuite l'utilisation de systèmes de production énergétique performants et basés le plus possible sur l'utilisation des énergies renouvelables. Certains de ces bâtiments parviennent alors à produire autant voire même plus d'énergie qu'ils n'en consomment, ce qui les fait progressivement passer du simple rôle d'utilisateurs situés en fin de réseau, au statut de maillon totalement intégrés à la chaîne de production énergétique.

Aux exigences de santé qu'il est nécessaire de satisfaire dans les BBC, en assurant le bon renouvellement de l'air dans la construction, s'ajoutent également celles liées à l'établissement d'un haut niveau de confort thermique dans les différentes zones de vie, aussi bien en hiver qu'en été. Si en France, la mise en place de protections solaires adaptées, d'une inertie bien maîtrisée ou encore d'un rafraîchissement nocturne passif peuvent constituer des solutions suffisantes pour maintenir le bien-être des occupants en période estivale, il reste beaucoup plus difficile de se passer complètement de tout système de chauffage, aussi faibles soient les besoins à couvrir, i.e. de l'ordre de 10 à 20 W/m². De plus, comme les déperditions par renouvellement d'air sont prédominantes par rapport à celles ayant lieu par les parois dans les BBC, l'installation d'un système efficace de récupération de chaleur sur l'air de ventilation limite finalement le recouvrement des besoins de chauffage aux seuls mois d'hiver. Apporter l'appoint de chaleur sur l'air puis l'utiliser comme unique vecteur énergétique pour assurer à la fois la ventilation et le chauffage dans les habitations de type BBC constitue alors une solution particulièrement intéressante en termes d'espace et de coût. En effet, il devient possible de s'affranchir du traditionnel réseau de distribution de chaleur et des émetteurs associés. Les systèmes combinés de ventilation et de chauffage sont ainsi plébiscités et connaissent un développement important dans les réalisations de type BBC.

Parallèlement aux efforts menés sur les économies d'énergie, un autre volet du *Plan Climat*, appelé plan national de développement des énergies renouvelables, prévoit de porter à 23% la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie de la France à l'horizon 2020, alors qu'elle était d'environ 10% en 2005. Ainsi, la nécessité de diversifier les sources d'énergie et de valoriser les systèmes utilisant des combustibles renouvelables donne un essor tout à fait remarquable à la filière bois énergie. En effet, avec une gestion raisonnée des ressources forestières, des ressources humaines qui les accompagnent et des conditions de sa transformation, le bois qui est un matériau noble et durable par essence, est également une source d'énergie renouvelable. À ce titre, le développement de la filière bois est favorisée par de nombreuses mesures gouvernementales, telles que les programmes *Bois Énergie* et *Biomasse Énergie*, la *Loi sur l'air* permettant le remplacement du système de production d'énergie dans les maisons individuelles ou encore des mesures financières incitatives comme le *Crédit d'Impôt Développement Durable*, mais aussi par la mise en place de repères, tels que le label *Flamme Verte*, la norme *NF bois de chauffage* ou encore la charte *Qualibois*, qui permettent respectivement d'identifier les appareils performants, les combustibles de qualité et les professionnels qualifiés du secteur.

Le chauffage au bois fait également l'objet d'une attention toute particulière dans le cadre du *Plan Particules*, car il est responsable de 40% des émissions nationales de particules fines, dont la présence en forte quantité dans l'air peut être dangereuse pour la santé et l'environnement. Aussi, le développement de ce mode de chauffage est particulièrement surveillé et orienté de telle sorte qu'il ne présente pas de risque sanitaire important au niveau de la qualité de l'air intérieur et extérieur. De plus, comme les constructions de type BBC sont particulièrement étanches, l'installation d'un appareil de chauffage au bois nécessite la mise en œuvre d'une alimentation indépendante en air de combustion pour éviter de prélever l'air initialement destiné à la ventilation du logement et limiter surtout le risque de refoulement des produits de combustion dans l'habitation en cas d'inversion de tirage.

Toutefois, l'installation d'un appareil de chauffage au bois est un choix qui connaît un fort engouement dans les habitations de type BBC, notamment grâce à l'amélioration des rendements de combustion des appareils, à la structuration progressive de la filière et à la bonne image véhiculée par la ressource bois énergie sur plan environnemental. Cependant, cette solution présente l'inconvénient majeur d'être une source ponctuelle d'émission de chaleur, d'une puissance souvent trop importante et qui reste principalement localisée dans la pièce de vie principale du logement où est installé l'appareil. En conséquence, un système de récupération et de distribution d'air chaud est couramment employé pour mieux répartir la chaleur au sein des différentes zones de l'habitation. Mais, la plupart des systèmes de distribution d'air chaud actuels fonctionnent en aspiration, c'est-à-dire qu'ils prélèvent l'air chaud au dessus de l'appareil pour le distribuer ensuite dans les différentes pièces de vie. Dans certains cas, ce fonctionnement en aspiration peut engendrer des risques importants pour les biens et les personnes, depuis la distribution d'un air sec, trop chaud et chargé de poussière, jusqu'aux cas extrêmes de propagation d'incendie ou d'intoxication au monoxyde de carbone. Il existe néanmoins quelques systèmes qui fonctionnent en pulsion, c'est-à-dire en soufflant l'air au sein d'un échangeur de chaleur, situé soit au niveau de l'habillage, soit au niveau du conduit de fumée de l'appareil de chauffage au bois, ce qui permet de limiter ces risques. Enfin, l'utilisation d'un système annexe de distribution d'air chaud dans une habitation de type BBC reste problématique, car c'est un élément qui peut contribuer au déséquilibre des écoulements d'air initialement établis par la ventilation.

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse reposent donc sur un double constat, à savoir l'exploitation des nouvelles possibilités offertes par le vecteur air pour répondre efficacement aux besoins de renouvellement d'air et de distribution de la chaleur dans les habitations de type BBC, ainsi que l'opportunité d'utiliser un appareil de chauffage au bois associé à un système de récupération et de distribution d'air chaud fonctionnant en pulsion pour bénéficier d'un appoint d'énergie d'origine renouvelable. L'objectif principal du projet consiste alors à développer un composant innovant, de type échangeur de chaleur, qui soit intégré au conduit de cheminée d'un appareil de chauffage au bois et couplé au système de renouvellement d'air du logement, de manière à former un système combiné utilisant l'air comme unique vecteur énergétique pour assurer à la fois la ventilation et le chauffage d'une habitation de type BBC, tout en y garantissant la bonne qualité de l'air intérieur, ainsi que le confort et la sécurité des occupants.

Après un exposé des enjeux énergétiques et environnementaux actuels, pour lesquels le rôle du secteur du bâtiment est souligné, le chapitre 1 développe tour à tour les principales caractéristiques des BBC, puis les différents facteurs contribuant à l'essor de la filière bois-énergie et enfin les conditions d'application du chauffage à air, avec une attention particulière portée sur les systèmes qui répondent à la fois aux besoins de chauffage et aux exigences de ventilation des habitations de type BBC.

Le chapitre 2 décrit ensuite les étapes menant au développement d'un prototype de conduit échangeur à triple paroi (CETP) pouvant s'intégrer au conduit de cheminée d'un poêle à granulés de bois. Le cahier des charges de ce produit innovant, les essais de caractérisation de ses performances en laboratoire et les propositions d'optimisation du prototype et de ses conditions de couplage sont alors présentés. Puis, un modèle mathématique est développé pour prévoir les échanges thermiques qui s'opèrent entre les différents fluides en présence au sein du conduit échangeur.

Enfin, le chapitre 3 est consacré aux réalisations expérimentales menées sur l'ensemble du système combiné de ventilation et de chauffage au bois, depuis l'étude de ses performances en laboratoire, jusqu'à son installation sur site dans deux habitations de type BBC, en passant par la vérification du bon accord entre les prévisions données par le modèle et les résultats expérimentaux.

Chapitre 1 :

Chauffage au bois et vecteur air dans les BBC

Le chapitre 1 expose le contexte énergétique et environnemental de la France, en soulignant l'importance du rôle du secteur du bâtiment dans la résolution de ces grands enjeux. L'analyse se focalise alors sur l'évolution des consommations énergétiques dans le sous-secteur résidentiel et sur le potentiel d'y généraliser l'utilisation de sources de production d'origine renouvelable. Les principales caractéristiques des bâtiments à basse consommation d'énergie (BBC) sont ensuite mises en évidence, notamment à travers la présentation de plusieurs programmes d'opérations performantes et des contraintes liées aux systèmes dans ce type de bâtiment. Puis, les différents facteurs contribuant à l'essor de la filière bois-énergie sont présentés, avec en particulier les mesures qui accompagnent et favorise le développement de ce mode de chauffage dans le secteur domestique. Les conditions d'application du chauffage à air et au bois dans les habitations de type BBC sont alors précisées, en donnant les niveaux de puissance thermique pouvant être transportés par l'air de ventilation et en dressant un inventaire des appareils au bois pouvant satisfaire aux exigences d'installation et d'utilisation dans ces bâtiments. Enfin, l'accent est porté sur les différents dispositifs de récupération et de distribution d'air chaud couramment associés aux appareils domestiques de chauffage au bois.

1.1. ÉNERGIE, ENVIRONNEMENT ET BÂTIMENT

La question énergétique est au premier plan des préoccupations internationales actuelles. La problématique consiste ainsi à fournir à chacun suffisamment d'énergie pour se chauffer, se déplacer et développer ses activités, sans hypothéquer les ressources de la planète. Les états ont en effet sous leur responsabilité l'anticipation et la gestion des conditions d'exploitation, de transformation, de transport et d'approvisionnement des ressources énergétiques, dont nos sociétés sont dépendantes pour assurer leur développement. Toutefois, à l'heure actuelle, ces ressources sont principalement d'origine fossile et sont épuisables, il est donc nécessaire d'établir une transition énergétique durable.

1.1.1. Enjeux énergétiques et environnementaux

Les deux indicateurs les plus utilisés pour mesurer la production et la consommation d'énergie sont l'énergie primaire¹ et l'énergie finale², toutes deux exprimées en tonne d'équivalent pétrole (tep³). Comme indiqué sur la Figure 1.1, au rythme actuel d'une consommation mondiale de près de 12 Gtep par an d'énergie primaire, les réserves prouvées⁴ d'énergie fossile sont d'environ 45 ans pour le pétrole, 65 ans pour le gaz, 220 ans pour le charbon et 75 ans pour l'uranium d'après [BP, 2011] et [Enerdata, 2011]. Si au lieu de raisonner à consommation constante, l'augmentation annuelle de la demande est également prise en compte, soit près de 2% par an depuis 30 ans, alors dans 50 ans environ l'ensemble des réserves prouvées d'énergie non renouvelable sera épuisé [Sidler, 2008]. Enfin, même en doublant les estimations ou en raisonnant sur les réserves ultimes⁵, l'état du stock mondial en énergie non renouvelable apparaît tristement dérisoire et implique nécessairement des modifications profondes de notre consommation dans les prochaines décennies.

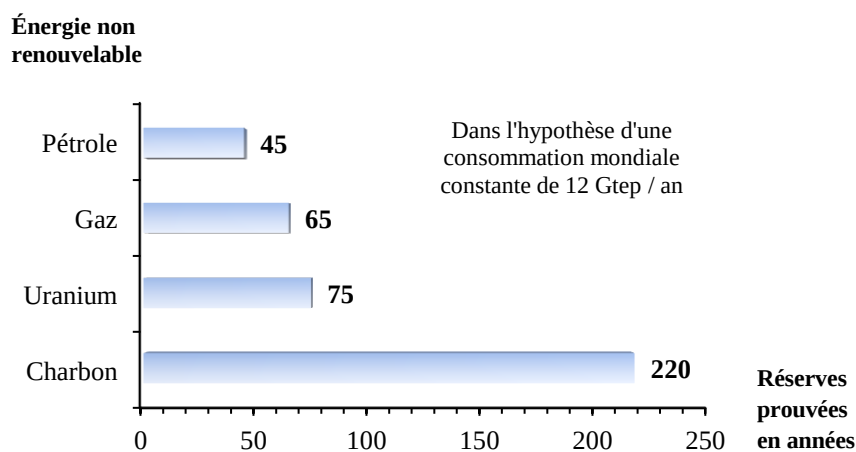


Figure 1.1 : Réserves prouvées d'énergie non renouvelable en année

¹ L'énergie primaire correspond à l'énergie brute non transformée après extraction. Un bilan de consommation en énergie primaire permet la mesure du taux d'indépendance énergétique d'un pays. Il s'établit autour de 50% pour la France qui consomme donc le double de ce qu'elle produit en énergie primaire, la différence devant être assurée par les importations.

² L'énergie finale correspond à celle qu'achète le consommateur. Un bilan en énergie finale est davantage adapté à l'analyse des besoins énergétiques des consommateurs, de leurs usages et des éventuels gisements d'économies d'énergie associés.

³ La tep est l'unité qui représente la quantité d'énergie obtenue sous forme de chaleur par la combustion d'une tonne de pétrole. 1 Gtep = 1 milliard de tep. 1 Mtep = 1 million de tep. 1 tep = 11 630 kWh. 1 kWh = 3,6 MJ.

⁴ Les réserves prouvées sont les ressources raisonnablement certaines d'être produites en utilisant les techniques actuelles, au prix actuel et selon les accords commerciaux et gouvernementaux en cours.

⁵ Les réserves ultimes correspondent aux réserves maximum qui sont supposées exister et qu'il serait possible d'extraire.

En effet, sous l'effet conjugué de l'accroissement de la population mondiale, avec la prévision de 9 à 10 milliards d'habitants à l'horizon 2050, des efforts des pays en voie de développement pour combler leur décalage économique, avec une croissance de 7,5 à 10% au Brésil, en Chine et en Inde, et du maintien d'une légère croissance de la demande énergétique dans les pays développés, le doublement de la demande mondiale en énergie primaire est à prévoir d'après [IEA, 2010], soit une consommation d'énergie primaire d'environ 20 Gtep dans les années 2040-2050.

Comme le montre la Figure 1.2, il existe aussi de fortes disparités entre la consommation d'énergie des zones industrialisées et celle des zones en développement [AFH2, 2007]. En effet, si la consommation énergétique moyenne mondiale d'énergie primaire est d'environ 1,8 tep par habitant et par an, les 29 pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), soit environ 1/5 de la population, consomment près de la moitié de la production mondiale. Ces disparités s'exercent aussi à l'échelle des pays avec des besoins d'énergie primaire d'environ 8 tep/an aux États-Unis, d'environ 4,5 tep/an en France et de moins d'1 tep/an dans de nombreux pays d'Afrique. Enfin, près d'1,6 milliards de personnes, soit environ 1/4 de la population mondiale, n'a toujours pas accès à une quelconque forme d'énergie commerciale autre que la biomasse traditionnelle.

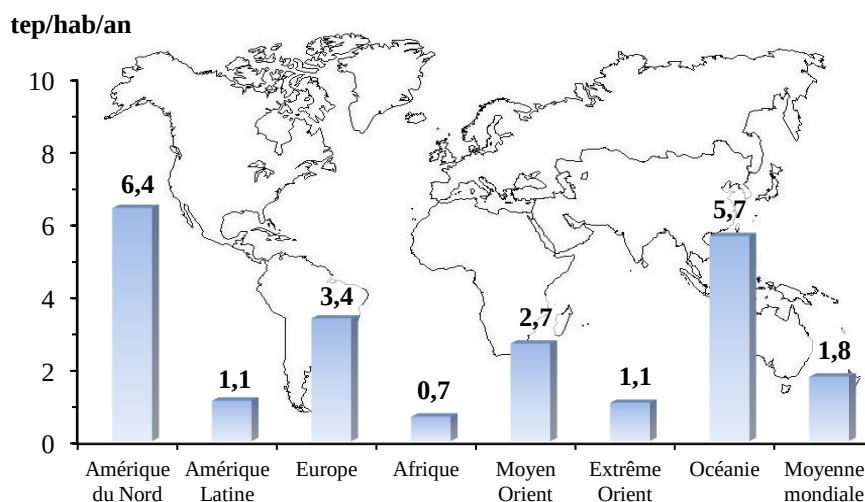


Figure 1.2 : Consommation moyenne d'énergie primaire par habitant et par an

Face à ces problématiques énergétiques d'ordre mondial, les 25 pays membres de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) se sont engagés à prendre des mesures d'urgence communes en cas de rupture d'approvisionnement pétrolier. Ils échangent ainsi régulièrement des informations sur l'énergie, coordonnent leurs politiques énergétiques et coopèrent en vue d'une utilisation rationnelle de l'énergie, en s'attachant à développer la part des énergies renouvelables, à augmenter les capacités de stockage d'énergie pour optimiser la gestion des flux et à réduire les émissions issues de la combustion d'énergies fossiles. Les enjeux énergétiques et environnementaux se rejoignent alors, car il s'agit aussi de limiter le réchauffement climatique en réduisant la part des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux activités humaines. En effet, si les émissions de GES peuvent être d'origine naturelle ou anthropique, la teneur en CO₂ dans l'atmosphère est passée de 260 parties par millions (ppm) avant la révolution industrielle à plus de 380 ppm de nos jours et celle-ci connaît toujours une croissance régulière de 2 ppm par an, ce qui ne laisse plus de doute quant à l'impact des activités humaines sur l'augmentation du réchauffement climatique, comme indiqué par le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) dans son rapport [GIEC, 2007].

1.1.2. Engagements internationaux et nationaux

Dans ce contexte, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) a été créé en 1972 dans le but de coordonner les activités des états dans le domaine de l'environnement, d'assister les pays dans la mise en œuvre de politiques environnementales et d'encourager le développement durable (cf. Figure 1.3). Cette dernière notion, conciliant le progrès économique, la justice sociale et la préservation de l'environnement, est définie dans le rapport Brundtland comme un « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » [Brundtland, 1987].

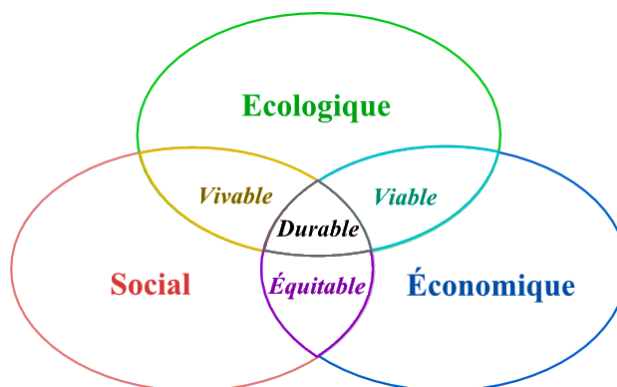


Figure 1.3 : Représentation schématique du développement durable

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques [CCNUCC, 1992] a ensuite été adoptée par 154 États lors du Sommet de la Terre en 1992 à Rio de Janeiro. Il s'agit du premier traité international sur le changement climatique visant à éviter les impacts anthropiques dangereux pour le climat. Trois grands principes y sont reconnus. Tout d'abord le principe de précaution, soulignant que l'incertitude scientifique quant aux impacts du changement climatique ne justifie pas de différer l'action. Puis, le principe de responsabilité commune mais différenciée, précisant que toutes les émissions ont un impact sur le changement climatique, mais que les pays les plus industrialisés portent une responsabilité accrue de la concentration actuelle de GES. Et enfin, le principe du droit au développement économique qui rappelle que les politiques mises en place devront tenir compte du droit au développement économique de chaque pays.

Depuis 2005, un texte est même inscrit dans la constitution française, consacrant le droit de chacun à vivre dans un environnement équilibré et respectueux de sa santé [Loi_Env, 2005]. Il s'agit de la Charte de l'Environnement qui souligne le rôle de l'éducation, de la formation, de la recherche et de l'innovation, ainsi que celui des politiques publiques pour promouvoir un développement durable conciliant protection de l'environnement, développement économique et progrès social.

En signant le Protocole de Kyoto en 1997, entré en application depuis le mois de février 2005, la France s'est engagée à ramener ses émissions moyennes de GES de la période 2008-2012, au niveau de celles de 1990. Cependant, la nécessité de réduction des émissions de GES va plus loin que le cadre défini sur la période 2008-2012 par le protocole de Kyoto. En effet, le GIEC précise qu'afin de contenir le réchauffement moyen de la Terre à 2°C maximum, il faudra réduire de 50% les émissions mondiales de GES entre 2005 et 2050. Cet objectif impose alors aux pays industrialisés la division par quatre de leurs émissions de GES à l'horizon 2050, c'est le célèbre « Facteur 4 », afin de laisser la possibilité aux pays en développement de poursuivre leur croissance [GIEC, 2007].

Pour préparer les suites du Protocole de Kyoto, les conférences de Copenhague en décembre 2009 et de Cancún en décembre 2010 ont ensuite permis l'adoption d'un texte de consensus par tous les grands pays du monde – les USA, la Chine, l'Inde, le Brésil et l'Union Européenne – et bien que non contraignant en termes d'objectifs chiffrés de réduction d'émissions de GES, il engage pour la première fois l'ensemble des nations dans un processus commun.

La France quant à elle poursuit l'objectif du « Facteur 4 » et prévoit la réduction de ces émissions de GES de 3 % par an sur l'ensemble des secteurs économiques. Ces priorités sont inscrites depuis juin 2003 dans la Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) ainsi que dans la loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique [Loi_POPE, 2005].

Puis, en suivant les préconisations des experts du GIEC, les 27 pays de l'Union Européenne ont adopté en décembre 2008 le « Paquet Énergie-Climat » qui entérine l'objectif des « 3 fois 20% » d'ici 2020, visant à réduire de 20% les émissions de GES, produire au moins 20% d'énergie par des procédés renouvelables et réduire de 20% la consommation globale en Europe. En France, les mesures à mettre en œuvre pour limiter les émissions de CO₂ sont décrites dans le Plan Climat, initié en 2004, actualisé en 2006, puis intégré au Grenelle Environnement depuis 2007 [Plan_Climat, 2010].

Enfin, compte tenu de l'inertie du système climatique, certains dérèglements apparaissent inévitables et demandent une adaptation des territoires et des comportements [Loi_GES, 2001]. Ainsi, la France a créé l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) et c'est le premier pays européen à se doter d'un Plan National d'Adaptation au Changement Climatique [PNACC, 2011-2015] pour anticiper, faire face et tirer parti des nouvelles conditions climatiques.

Comme le montre la Figure 1.4, la France prévoit ainsi réduire de près de 23 % ses émissions de GES à l'horizon 2020, avec 437 millions de tonnes d'équivalent CO₂ (MteqCO₂)⁶ par rapport aux niveaux de 1990 (565 MteqCO₂), à travers les engagements pris lors du Grenelle Environnement et conformément aux recommandations formulées par le GIEC pour atteindre le « Facteur 4 » en 2050.

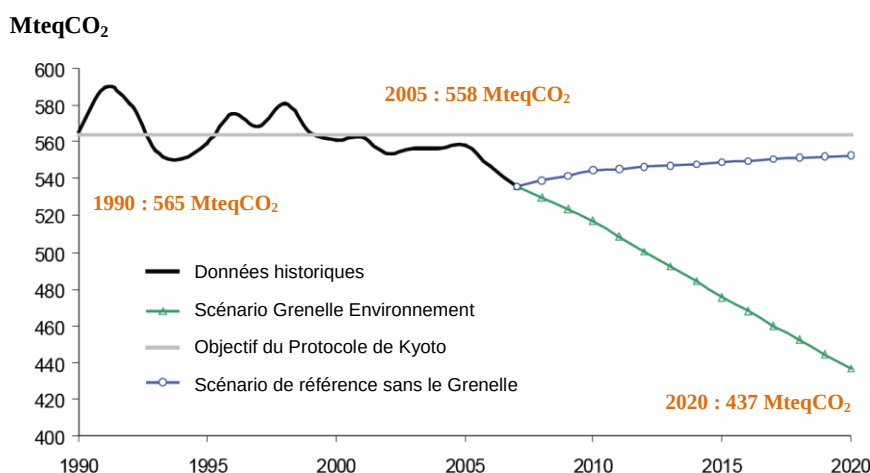


Figure 1.4 : Projection d'émissions de GES en France à l'horizon 2020

⁶ Le MteqCO₂ est l'unité utilisée pour caractériser le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) d'un gaz, qui traduit sa propension à contribuer à l'effet de serre, en comparaison de celle du CO₂ prise égale à 1. Le PRG de chaque gaz est calculé sur un horizon fixé à 100 ans afin de tenir compte de la durée de séjour de la substance dans l'atmosphère. Les PRG des six gaz pris en compte par le Protocole de Kyoto sont : CO₂ = 1 ; CH₄ = 21 ; N₂O = 310 ; HFC = 1 608 ; PFC = 7113 ; SF₆ = 23900.

Ainsi, pour assurer sa transition vers une société et une économie plus sobres en énergie et en carbone, la mobilisation de tous les secteurs de l'économie est nécessaire, en particuliers les secteurs des transports, des industries et des bâtiments. À ce titre et dans le cadre de la mise en œuvre du Grenelle Environnement, le Plan Climat de la France [Plan_Climat, 2010] affiche des objectifs chiffrés de réduction de ses émissions de GES sur la période 2005-2020, avec :

- une baisse de 15 MteqCO₂ dans le secteur des transports, grâce à la mise en place d'un vaste programme d'infrastructures de transports alternatifs, de réduction des émissions des véhicules et de mesures incitatives en direction des professionnels et des particuliers ;
- une baisse de 31 MteqCO₂ dans le secteur des industries de l'énergie, grâce à des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique, de développement des énergies renouvelables et de modernisation du parc de production thermique d'électricité ;
- une baisse de 47 MteqCO₂ dans le secteur des installations industrielles, grâce au système européen de plafonnement des quotas d'émissions de GES et au renforcement du dispositif décidé en 2008 lors de l'adoption du « Paquet Énergie-Climat » de l'Union Européenne ;
- et une baisse de 55 MteqCO₂ dans le secteur du bâtiment, qui regroupe les deux sous-secteurs résidentiel et tertiaire, grâce à la mise en œuvre du Plan Bâtiment du Grenelle Environnement, dont les objectifs sont de généraliser les bâtiments à basse consommation (BBC) dès 2012, les bâtiments à énergie passive (BEPAS) à l'horizon 2020 et les bâtiments à énergie positive (BEPOS) à l'horizon 2050 (cf. Figure 1.5), de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38% d'ici à 2020 en conduisant un programme ambitieux de 400 000 rénovations complètes de logements chaque année à partir de 2013, d'engager la rénovation de tous les bâtiments de l'État dès 2012, de finaliser celle des 800 000 logements sociaux les plus énergétivores avant 2020, et d'accompagner la mobilisation de tous les professionnels du secteur pour relever les défis inhérents à une telle mutation du secteur.

En étant le secteur qui affiche l'objectif de réduction d'émissions de GES le plus important, le secteur du bâtiment possède donc un rôle décisif dans le respect des engagements de la France pour la résolution des enjeux énergétiques et environnementaux [PBG_BEPOS, 2011].

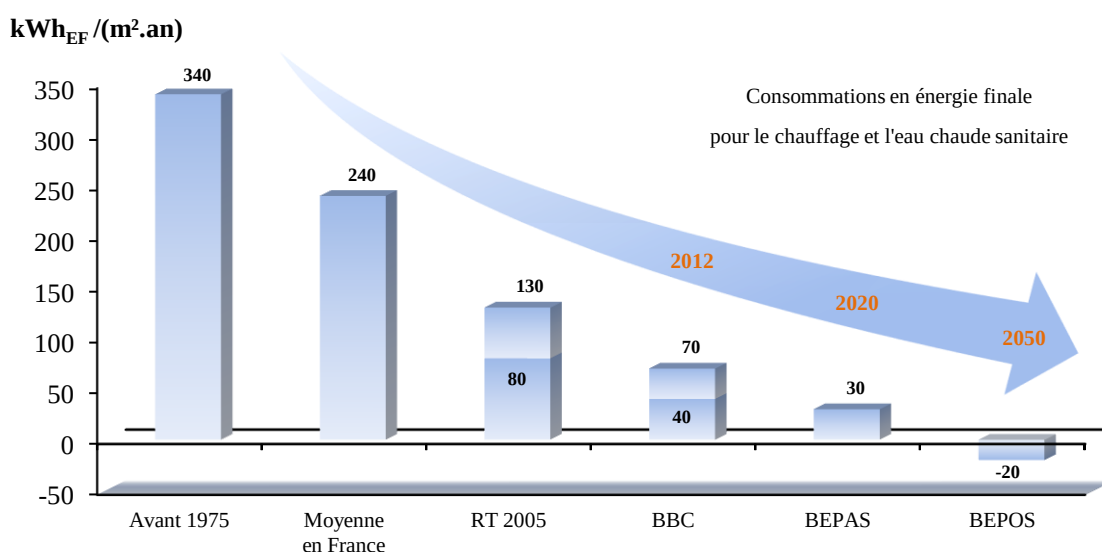


Figure 1.5 : Évolution programmée de la consommation énergétique des bâtiments en France

1.1.3. Évolutions réglementaires récentes

L'environnement réglementaire en faveur de la réduction des consommations énergétiques du secteur du bâtiment et de la promotion des énergies renouvelables est à la fois riche et marqué par de nombreuses évolutions, tant au niveau européen que national. À ce titre et pour une meilleure appréhension du contexte, les directives européennes dites DPEB⁷ et Directive EnR sont détaillées.

➤ **Directive PEB ou DPEB [DIR_PEB, 2002] [DIR_PEB, 2010]**

En décembre 2002, le Parlement Européen a adopté une directive relative à la performance énergétique des bâtiments⁸ (DPEB). Celle-ci répond alors à deux préoccupations de poids : la première est la mise en application du protocole de Kyoto pour la réduction des émissions de GES. La seconde concerne la sécurité d'approvisionnement énergétique de l'Union Européenne, dont 50% de l'énergie consommée est importée. À ce titre, le bâtiment est un secteur d'intervention privilégié, car il totalise 40% des dépenses énergétiques européennes. Ainsi, en dictant les actions à entreprendre pour améliorer la performance énergétique des bâtiments, la DPEB instaure dès 2002 un support réglementaire pour le traitement des questions d'indépendance énergétique des États membres et du respect de leurs engagements face aux enjeux environnementaux et climatiques.

Depuis le 08 septembre 2010, la refonte de la DPEB est entrée en vigueur avec la nouvelle directive 2010/31/UE, abrogeant la précédente qui laissait trop de marge dans son application et approfondissant le cadre commun de mise en application. La nouvelle DPEB décrit ainsi les objectifs et les fonds d'aide à mettre en place par les différents États membres pour augmenter l'impact de la directive originelle. Elle s'articule autour de 4 mesures principales d'action, dont la transposition doit être réalisée avant le 09 juillet 2012 et qui imposent :

- L'introduction d'une méthodologie commune de calcul de la performance énergétique des bâtiments, qui tienne compte de l'exposition solaire du bâtiment, des caractéristiques de l'enveloppe et des performances des systèmes utilisés pour répondre aux 5 usages principaux ;
- La fixation d'exigences minimales de performance énergétique des bâtiments avec des normes revues tous les 5 ans, en cas de construction ou de rénovation substantielle d'un bâtiment, ou en cas d'installation ou de remplacement de systèmes techniques, assortie d'une généralisation de l'introduction de systèmes intelligents de mesure et de contrôle actif pour économiser l'énergie et de l'obligation de contrôle régulier des systèmes de chauffage et de climatisation ;
- La promotion de bâtiments dont la consommation d'énergie est quasi nulle d'ici à la fin 2020 pour toutes les nouvelles constructions et d'ici à la fin 2018 pour tous les bâtiments publics, avec la mise en place de plans nationaux décrivant les objectifs intermédiaires et les moyens mis en œuvre pour multiplier ce type de bâtiment dès 2015 ;
- L'élaboration de certificats de performance énergétique pour tous les bâtiments ou éléments de bâtiment, neufs ou existants, qui sont construits, vendus ou loués, occupés par une autorité publique ou fréquemment visitée par le public, avec l'obligation d'affichage des performances et de recommandations pour l'amélioration des coûts.

⁷ DPEB : Directive relative à la Performance Énergétique des Bâtiments. La nouvelle directive n°2010/31/UE du 19/05/10 abroge la précédente directive n°2002/91/CE du 16/12/2002.

⁸ Performance énergétique des bâtiments : quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut de manière conventionnelle l'énergie utilisée pour les 5 usages que sont le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage.

➤ **Directive EnR** [DIR_EnR, 2009]

Depuis le 25 juin 2009, la directive 2009/28/CE du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables est entrée en vigueur en modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE⁹ et 2003/30/CE¹⁰. Cette directive européenne s'inscrit dans le cadre des objectifs du « Paquet Énergie-Climat » visant l'obtention des « 3 fois 20% » d'ici 2020. Elle fixe des contraintes par pays et précise les conditions de mise en œuvre pour atteindre 20% d'énergies renouvelables (EnR) dans la consommation totale d'énergie de l'Union Européenne.

Ce texte dont la transposition est effective depuis le 05 décembre 2010 exige notamment la mise en place par chacun des États membres d'un plan d'action national qui fixe la part de l'énergie produite à partir des sources renouvelables dans les consommations liées aux transports, à la production d'électricité et au chauffage. À cet effet, la coopération entre les États pour développer les échanges ou la création de sites de production d'énergie à partir de sources renouvelables est fortement encouragée. En outre, l'origine de l'électricité ou de l'énergie de chauffage doit pouvoir être garantie et les consommateurs informés.

En complément de la traçabilité et de la priorité donnée à la consommation d'énergie produite à partir de sources renouvelables, les modalités d'utilisation des biocarburants y sont définies ainsi que les exigences de durabilité concernant l'utilisation de sources de biomasse solide et gazeuse pour l'électricité, le chauffage et le refroidissement. À ce titre, les objectifs spécifiques mis en évidence par le Rapport¹¹ du 25 février 2010 de la Commission consistent à faire en sorte que l'utilisation de la biomasse pour le chauffage et l'électricité conduise à :

- un traitement durable de la ressource biomasse en cohérence avec les politiques existantes ;
- une diminution significative des émissions de GES par rapport à la production d'énergie basée sur l'utilisation de combustibles fossiles ;
- un rendement élevé de conversion de la biomasse en électricité, chaleur ou froid permettant d'atteindre les objectifs fixés de façon rentable.

La Commission Européenne admet ainsi que les objectifs de 2020 vont impliquer une augmentation globale de la bioénergie dans les domaines des transports, de la production d'électricité et du chauffage/refroidissement, avec le doublement attendu de la consommation de bioénergie en 2020 par rapport à 2005, comme précisé dans le plan action biomasse [COM_Biomasse, 2005]. En particulier, le secteur du chauffage et du refroidissement est pressenti pour rester le consommateur le plus important de biomasse, dont la demande supplémentaire en Europe pour la seule ressource bois est estimée entre 425 et 440 millions de tonnes d'ici 2020.

La question de la gestion durable des ressources d'origine renouvelable, dont le potentiel est mis en exergue par le dernier rapport du [GIEC, 2011], prend alors toute son ampleur, de même que celle de l'augmentation des prix des EnR suite à l'évolution croissante de la demande.

⁹ La directive 2001/77/CE du 27 septembre 2001 est relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité.

¹⁰ La directive 2003/30/CE 8 mai 2003 est relative à la promotion de l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports.

¹¹ Rapport du 25 février 2010 de la Commission au Conseil et au Parlement européen sur les exigences de durabilité concernant l'utilisation de sources de biomasse solide et gazeuse pour l'électricité, le chauffage et le refroidissement, COM(2010) 11 final – Non publié au Journal officiel.

➤ **Stratégie Nationale de Développement Durable** [SNDD, 2010-2013]

Pour se conformer aux exigences des différentes directives européennes, mais surtout à leur rapide évolution et à l'extension de leurs champs d'application, la France possède depuis 2003 une Stratégie Nationale de Développement Durable, dite SNDD, dans laquelle figure notamment l'ensemble du Grenelle Environnement, dont le volet bâtiment concentre l'ensemble des mesures destinées à promouvoir la réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES dans ce secteur. Ici encore, une description des récentes évolutions est proposée :

Dans un contexte marqué par des enjeux énergétiques et environnementaux de plus en plus prégnants, par des crises économique et financière et par une exigence accrue de solidarité, la France a adopté le 27 juillet 2010 sa nouvelle Stratégie Nationale de Développement Durable pour la période 2010-2013 (SNDD 2010-2013). Élaborée après une longue concertation avec l'ensemble des ministères et des acteurs socio-économiques et organisée autour d'une économie verte et équitable, la SNDD 2010-2013 définit 9 défis clés qui s'étendent à tous les champs du développement durable, en tenant compte des enjeux économiques et sociaux au même titre que des enjeux environnementaux, de manière à adopter des objectifs prioritaires et à privilégier certains leviers d'actions pour répondre au mieux à l'ensemble des besoins actuels et futurs des personnes et de la société.

➤ **Grenelle Environnement** [Grenelle, 2007] [Loi_Grenelle1, 2009] [Loi_Grenelle2, 2010]

Initié en 2007, le Grenelle Environnement est un processus de concertation national qui après avoir fait émerger plusieurs centaines de propositions par des groupes thématiques réunissant les collectivités territoriales, l'État, les principales ONG environnementales, les employeurs et les salariés, a permis la formulation de 268 engagements précis, qui ont ensuite été traduits en objectifs chiffrés et en actions concrètes, chantier par chantier et secteur par secteur, et composent finalement la loi Grenelle 1¹² du 3 août 2009. Ces engagements permettent notamment la transposition de nombreuses mesures dictées par les directives européennes, dont celles détaillées précédemment.

La loi Grenelle 2¹³ du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement marque ensuite l'entrée du processus dans la phase d'application et de territorialisation des 268 objectifs entérinés par le premier volet législatif du Grenelle Environnement. Un an après le vote de la loi Grenelle 2, une majorité des 199 décrets d'applications qui la composent a été publiée, rendant effective la mutation dans les six grands chantiers identifiés : Bâtiments ; Transports ; Énergies ; Biodiversité ; Risques, déchets et santé ; Gouvernance.

➤ **Plans Climat-Énergie Territoriaux** [PCET, 2007]

Dans le cadre du Grenelle Environnement, une vaste panoplie de mesures est mise en place pour la réalisation de l'objectif européen de réduction de 20% des émissions de GES. Des schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie incluant un schéma de raccordement au réseau des énergies renouvelables sont instaurés. L'État, les régions, les départements et les collectivités de plus de 50 000 habitants doivent adopter des Plans Climat-Énergie Territoriaux (PCET) avant fin 2012 et établir leur bilan carbone, cette dernière mesure étant aussi exigée des entreprises de plus de 250 salariés. Un cadre législatif est également créé sur les dispositifs expérimentaux de capture et stockage de CO₂.

¹² Grenelle 1 : Loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

¹³ Grenelle 2 : Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement

➤ **Plan Bâtiment Grenelle** [PBG_RA, 2011]

Pour le secteur du bâtiment, la politique énergétique de la France s'articule autour de trois axes majeurs : la réglementation, la sensibilisation et l'incitation. L'ensemble des dispositifs mis en place, complémentaires les uns des autres, s'applique aux bâtiments neufs comme aux bâtiments existants. De plus, cette politique générale se renforce progressivement au fil du temps en s'appuyant de façon marquée sur la recherche, l'innovation, l'expérimentation et la diffusion de solutions nouvelles. Pour atteindre ces objectifs, le Plan Bâtiment Grenelle (PBG) prévoit ainsi :

- Le renforcement de la réglementation thermique tous les 5 ans
- L'extension de la mise en application des certificats d'économie d'énergie
- L'amélioration des crédits d'impôt dédiés aux économies d'énergie
- L'encouragement des actions de recherche et d'innovation

Le Plan Bâtiment Grenelle tient ainsi pour mission de piloter la mise en œuvre et le déploiement de nombreuses mesures pour réduire de 38% la consommation d'énergie et de 50% les émissions de GES dans le secteur du bâtiment. À cet effet, il s'organise en deux volets destinés, d'une part, à favoriser un urbanisme économe en ressources foncières et énergétiques, et d'autre part, à mettre en œuvre conjointement une rupture technologique dans les constructions neuves et une rénovation thermique accélérée du parc ancien, avec :

- la généralisation des bâtiments à basse consommation dès 2012
- la rénovation des bâtiments de l'État et des établissements publics avant fin 2012
- la rénovation de 400 000 logements par an dès 2013
- la rénovation pour l'accessibilité des bâtiments recevant du public avant 2015
- la rénovation des 800 000 logements sociaux les plus énergivores d'ici 2020
- la généralisation des bâtiments à énergie positive en 2020

Dans le cadre du Plan Bâtiment Grenelle, il faut également préciser que le bâtiment est appréhendé de manière globale au regard de ses multiples interactions avec ses occupants (sécurité, santé, accessibilité...) et avec son environnement (économie des ressources, déchets, gestion des risques, aménagement du territoire...). À titre d'exemple, le Programme National de Requalification des Quartiers Anciens Dégradés (PNRQAD), instauré par la loi du 25 mars 2009 de mobilisation pour le logement et la lutte contre l'exclusion, associe aux objectifs de requalification, celui de favoriser la mixité sociale par un meilleur équilibre entre l'habitat et la présence d'activités de services.

Pour rendre effective l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, le bureau du comité stratégique du Plan Bâtiment Grenelle a ainsi souligné au début de l'année 2011 la nécessité d'apporter une réponse globale à 3 défis interdépendants grâce à une mobilisation complète touchant :

- tous les acteurs de la rénovation énergétique (ménages, entreprises et professionnels) pour que la mutation s'effectue de manière généralisée ;
- tous les outils de la formation pour la rendre accessible à l'ensemble de la filière ;
- et tous les territoires pour apporter l'innovation à tous les niveaux dans le secteur.

1.1.4. Influence du secteur du bâtiment

Le Plan Bâtiment intégré au Plan Climat de mise en œuvre du Grenelle Environnement décrit donc notamment les mesures transposant la directive européenne DPEB relative à la performance énergétique des bâtiments, aussi bien pour les bâtiments neufs qu'existants. En effet, il est nécessaire d'ici 2050, d'améliorer la performance énergétique de tous les bâtiments, avec principalement les 3 milliards de m² de bâtiments existants à réhabiliter, en cherchant à atteindre le plus tôt et le plus largement possible un facteur de réduction d'émission de CO₂ de 3,5 à 4 en moyenne. En parallèle, les bâtiments neufs doivent être les plus performants possibles et atteindre un facteur de réduction d'émission de CO₂ de 7 à 8 en moyenne. Enfin, pour atteindre l'objectif fixé, de nombreux bâtiments à très faibles besoins énergétiques, voire à production nette d'énergie, doivent être réalisés.

1.1.4.a. Poids et potentialités du secteur du bâtiment [ADEME_Bât, 2011]

D'après l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le secteur du bâtiment en France totalise dans son ensemble plus de 120 MteqCO₂, soit 23% des émissions nationales de GES. Ces émissions proviennent pour les 2/3 du secteur résidentiel et pour 1/3 du secteur tertiaire. Chaque français libère ainsi dans l'atmosphère environ deux tonnes de CO₂ par an.

Le secteur du bâtiment est aussi le premier poste de consommation énergétique avec environ 70 Mtep, soit près de 43% de l'énergie finale en France. Cela représente chaque année plus d'une tonne d'équivalent pétrole consommée par chaque Français.

Le secteur résidentiel-tertiaire apparaît donc comme un vivier d'économie d'énergie et toute action menée dans ce sens constitue une opportunité de réduction des émissions de CO₂. De plus, les sources d'énergie renouvelable y sont utilisables sous différentes combinaisons et des modifications sont possibles sur la durée de vie des bâtiments. Enfin, de nombreuses technologies performantes sont déjà disponibles, les acteurs motivés et la demande présente au niveau des publics concernés.

Ainsi, pour diviser par 4 les émissions de GES d'ici 2050 dans le secteur du bâtiment, il faut abaisser la consommation énergétique surfacique du parc français à environ 50 kWh/m²/an contre près de 240 kWh/m²/an aujourd'hui. Ce défi est d'autant plus important que la consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de 30% au cours des 30 dernières années du fait de l'accroissement du parc des bâtiments, avec 40% de logements en plus en 30 ans, de l'accroissement du nombre de maisons individuelles, de l'accroissement de la surface moyenne des logements, de la diminution de la taille des ménages, de l'augmentation du confort et de l'apparition de besoins importants en électricité.

En effet, même si sa consommation connaît une nette diminution, d'environ 35% depuis 1973, le chauffage reste le premier poste de consommation dans les bâtiments, totalisant respectivement les 2/3 et 1/3 de la facture énergétique environ dans le résidentiel et dans le tertiaire [SOeS, 2011]. Mais surtout, cette tendance à la baisse des consommations de chauffage est contrebalancée par une forte augmentation de la consommation des usages spécifiques de l'électricité (USE¹⁴), aussi appelés usages captifs de l'électricité, qui deviennent le second poste de consommation devant la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Ainsi, entre 2005 et 2010, la consommation moyenne d'énergie finale du secteur du bâtiment reste stabilisée autour de 70 Mtep environ.

¹⁴ USE : électroménager, éclairage, bureautique, TV, hi-fi, loisirs numériques, renouvellement et traitement d'air...

Compte tenu de l'analyse du poids et des évolutions des différents postes de consommation dans le secteur du bâtiment, les priorités d'actions sont donc d'agir tout d'abord sur le chauffage et les usages spécifiques de l'électricité en cherchant à limiter au maximum les besoins, puis de recourir au choix de sources d'énergie très performantes, faiblement émettrices et d'origine renouvelable.

Les opérations conduisant à une diminution significative des consommations de chauffage consistent le plus souvent à optimiser l'enveloppe du bâtiment ainsi que les performances de l'appareil de chauffage. Il s'agit cependant d'opérations lourdes et coûteuses qui restent difficiles à mener sans aide pour les particuliers. Pour la réduction des usages spécifiques de l'électricité, l'opération consiste au choix d'équipements économes en énergie, associée à une certaine sobriété des comportements. Elle est plus accessible pour les ménages, car elle peut être progressive et nécessite ainsi moins d'investissement. Enfin, le choix de sources d'énergie à faible impact environnemental est une opération qui peut être appuyée par des mesures incitatives, mais qui est parfois rendue difficile d'un point de vue administratif et souvent caractérisée par un investissement significatif.

De plus, compte tenu du taux de renouvellement du parc, qui est d'environ 1% par an pour le résidentiel et d'environ 1,75% par an pour le tertiaire, seul un tiers du parc peut être amélioré en trente ans par des constructions neuves. L'effort à mener porte donc davantage sur l'ancien que sur le neuf. Aussi, la réussite du « Facteur 4 » ne peut être le seul fait des nouvelles constructions, aussi performantes soient-elles, car s'il est plus facile d'assurer l'efficacité énergétique d'un bâtiment lors de sa phase de conception que lors d'une opération de réhabilitation, il ne se construit que 400 000 nouveaux logements par an, pour un parc existant qui en totalise plus de 30 millions. C'est donc par la généralisation des actions cumulées, de très haute maîtrise de l'énergie dans les constructions neuves et de réhabilitations lourdes dans l'existant, qu'il est possible d'atteindre des économies d'énergie conséquentes et durables qui garantissent la sobriété énergétique du secteur du bâtiment.

1.1.4.b. Part du résidentiel [ADEME_Bât, 2011]

Pour distinguer le poids du résidentiel par rapport au tertiaire, on peut préciser qu'il y a en France plus de 30 millions de logements qui représentent une surface chauffée de plus de 2 milliards de m², à comparer aux 814 millions de m² chauffés dans le secteur tertiaire. Ainsi, en totalisant 42,8 Mtep d'énergie finale consommée, le résidentiel représente près des 2/3 (62,3%) de la consommation énergétique finale de l'ensemble du secteur du bâtiment. Pour un ménage français, la facture annuelle de chauffage s'élève en moyenne à environ 900 €, avec cependant de grandes disparités qui tendent à s'accroître suite à la hausse du prix des énergies. Les dépenses de chauffage peuvent ainsi varier de 250 € pour une maison à basse consommation à plus de 1800 € pour une maison mal isolée.

➤ Usages des consommations

Comme le montre la Figure 1.6, le chauffage représente près des 2/3 de l'ensemble de la consommation d'énergie finale du résidentiel. Le poids de la consommation des usages spécifiques de l'électricité (USE) dépasse quant à lui celle de l'eau chaude sanitaire (ECS). En outre, le chauffage contribue à la majeure partie des émissions de CO₂ du secteur en raison du contenu élevé en carbone des combustibles fossiles et de l'électricité¹⁵ utilisée lors des périodes très froides.

¹⁵ L'électricité possède un contenu en carbone assez élevé, car il faut appliquer un coefficient de conversion de 2,58 à la valeur de consommation exprimée en énergie finale pour obtenir la consommation électrique en énergie primaire.

En 2008, la répartition moyenne de la consommation d'énergie par usage dans le résidentiel est ainsi de 64,4% pour le chauffage, 11,6% pour l'eau chaude sanitaire (ECS), 6,5% pour la cuisson et 17,5 pour les usages spécifiques de l'électricité (USE) qui continuent leur progression (+1,6%).

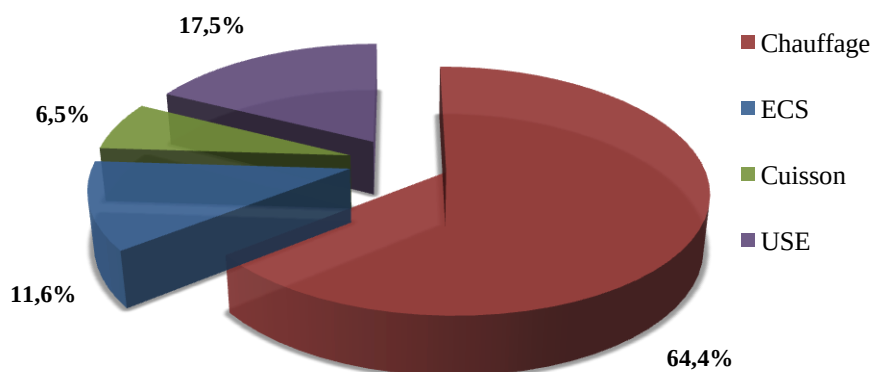


Figure 1.6 : Répartition des consommations énergétiques finales dans le résidentiel par usage

Néanmoins, il est important de préciser que des évolutions majeures ont lieu dans le secteur résidentiel, avec des consommations unitaires moyennes de chauffage dans le parc existant qui ont diminué d'environ 40% en 25 ans, alors que les consommations moyennes unitaires des usages spécifiques de l'électricité y ont augmenté de près de 75% sur cette période.

➤ **Types d'énergie pour le chauffage et l'ECS**

De manière plus détaillée, les énergies les plus utilisées pour le chauffage sont le gaz à 44%, l'électricité à 32,5% puis le fioul à 15,5%. Les réseaux de chaleur urbains et le bois contribuent respectivement à 4,1% et 3,6% des consommations de chauffage, mais ils sont appelés à connaître une forte progression dans les prochaines années sous l'effet de mesures incitatives. En revanche, le chauffage au fioul connaît une forte baisse, touché de plein fouet par la hausse des prix du pétrole et les encouragements à changer les anciens systèmes de chauffage. Pour les consommations relatives à l'ECS, l'utilisation de l'électricité à hauteur de 45% devance cette fois celle du gaz qui est de 39%. Le fioul est quant à lui encore utilisé à hauteur de 11% de l'énergie finale consommée pour l'ECS.

➤ **Nature et poids des USE dans les consommations d'électricité**

La croissance soutenue des USE dans le résidentiel est principalement liée à un plus haut degré d'équipement des ménages, notamment ceux liés à l'électronique et à l'informatique. De manière plus générale, la progression des consommations d'électricité depuis dix ans s'explique par le développement du chauffage électrique et des pompes à chaleur et dans une moindre mesure de la climatisation. Cette dernière, qui concerne 4% des logements environ, est d'ailleurs intégrée dans les consommations des USE. Pour avoir une idée plus précise de l'utilisation de l'électricité dans le résidentiel, les USE représentent le premier poste de consommation (41%), devant le chauffage (36%), l'ECS (14%) et la cuisson (8%). En particulier, les trois usages domestiques que sont l'éclairage, le froid et le lavage totalisent à eux seuls 70% des USE. La consommation des produits bruns (TV, magnétoscope, hi-fi, décodeurs...) est quant à elle en forte croissance et représente aujourd'hui plus de 16% des consommations des USE, notamment en veilles souvent inutiles.

➤ Types d'énergie consommée

La Figure 1.7 donne la répartition en pourcentage des différentes énergies consommées dans le résidentiel en 2009. Le gaz et l'électricité se partagent ainsi de manière équitable près des 2/3 de l'énergie finale consommée dans le résidentiel. Il est également intéressant de constater que le bois et le fioul sont utilisés dans des proportions sensiblement équivalentes bien qu'ils connaissent des évolutions contraires, avec plus de 5% de baisse pour le fioul et près de 4% de hausse pour le bois.

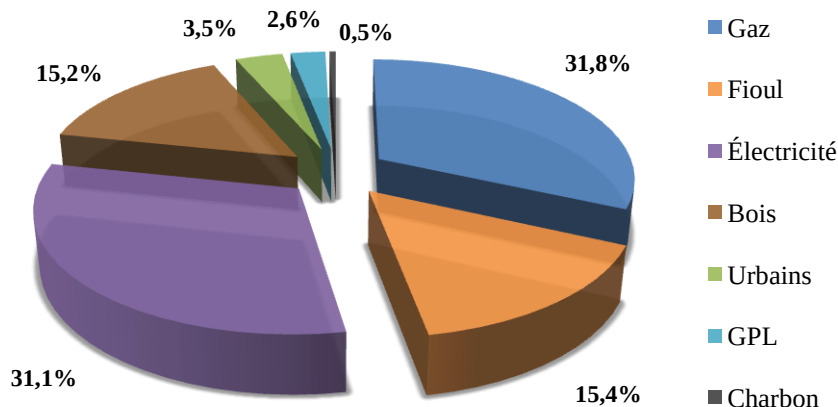


Figure 1.7 : Répartition des consommations énergétiques finales dans le résidentiel par type d'énergie

➤ Émissions de CO₂ et de CO

Entre 1973 et 2008, les émissions totales de CO₂ du parc de logements, dont les trois quarts sont dues au chauffage, ont été réduites d'environ 30% alors que sa taille augmentait de plus de moitié. Aujourd'hui, même si son rythme est moins marqué qu'entre 1973 et 1982, avec les deux chocs pétroliers, cette baisse des émissions se poursuit grâce aux opérations d'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions (meilleure isolation et augmentation du rendement des appareils) et de substitution progressive des sources énergétiques les plus polluantes par des énergies à moindre impact environnemental.

Les émissions de CO des bâtiments ont été abaissées quant à elle de près de 70% depuis les années soixante dix, mais avec plus de 30% des émissions nationales, ce secteur représente la deuxième source émettrice de CO derrière le secteur de l'industrie et devant celui des transports. De plus, le CO issu de la combustion d'énergie fossile est malheureusement responsable chaque année de nombreux décès par intoxication dans des logements mal ventilés et présentant des appareils au fonctionnement défectueux.

Les spécificités de la consommation énergétique et de l'impact environnemental du résidentiel résultent donc d'une évolution des comportements impulsée d'une part, par la hausse des prix de l'énergie et d'autre part, par des mesures de promotion des économies d'énergie et d'utilisation de sources d'origine renouvelable. En effet, pour atteindre rapidement des performances élevées en neuf et en réhabilitation, sans toutefois contraindre le secteur économique du bâtiment et les occupants à des mutations violentes qu'ils ne pourraient pas supporter, l'État met en place toute une palette d'outils réglementaires, de mesures incitatives et d'actions d'information.

1.2. MUTATION DU SECTEUR DU BÂTIMENT

1.2.1. Dispositions réglementaires

En 1974, après le premier choc pétrolier, la France a établi sa première réglementation thermique pour les constructions neuves, qu'elle a ensuite progressivement renforcée en 1977, en 1982, en 1988, en 2000 et en 2005. Avec la prochaine réglementation thermique en 2012, le rythme de ces renforcements réglementaires est maintenu à 5 ans environ de manière à généraliser la construction de bâtiments à énergie positive d'ici 2020 [RT-bâtiment, 2012].

➤ **RT 2005** [Arrêté_RT2005, 2006] [Décret_RT2005, 2006]

Depuis le 1^{er} septembre 2006, la réglementation thermique 2005 (RT 2005) s'applique aux bâtiments neufs des secteurs résidentiel et tertiaire. Le Plan Climat en a fixé les objectifs en programmant une amélioration de la performance des constructions neuves d'au moins 15% par rapport à la précédente réglementation dite RT 2000, avec une perspective de progrès tous les cinq ans pour atteindre moins 40% en 2020. Cette réglementation thermique impose le respect d'exigences pour la consommation d'énergie et la température intérieure atteinte en été, ainsi que des obligations au niveau de l'isolation, de la ventilation, du système de chauffage, etc. Elle donne également priorité à la limitation du recours à la climatisation et à une plus grande maîtrise de la demande en électricité.

➤ **RT 2012** [Arrêté_RT2012, 2010] [Décret_RT2012, 2010]

La réglementation thermique 2012 (RT 2012) tient pour objectif de généraliser la construction des bâtiments à basse consommation dès le 28 octobre 2011 pour le secteur tertiaire et les zones de l'ANRU, puis dès le 1^{er} janvier 2013 pour l'ensemble des nouveaux logements. Tout en laissant une plus grande liberté de conception aux maîtres d'œuvre, la RT 2012 est dite performantielle au sens où elle est basée sur 3 indicateurs propres au bâtiment (Bbio, Cep et Tic) qui doivent être inférieurs ou égaux à une valeur d'exigence maximale ou de référence (Bbio_{max}, Cep_{max} et Tic_{ref}). Ainsi, la RT 2012 évalue la performance globale du bâtiment et non plus les performances des éléments constructifs et des systèmes énergétiques pris séparément. Ces exigences maximales sont modulées selon la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements et les faibles émissions de CO₂ pour le bois énergie et certains réseaux de chaleur vertueux.

- L'indice Bbio, exprimé en valeur absolue, permet à la fois de caractériser l'impact et d'imposer l'optimisation de la conception bioclimatique sur la performance énergétique du bâti (chauffage, refroidissement et éclairage) indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre. Il doit être inférieur à une valeur maximale : **Bbio ≤ Bbio_{max}**
- L'indice Cep, exprimé en valeur absolue, caractérise la consommation d'énergie primaire du bâtiment pour les 5 usages de consommation que constituent le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage. Il doit être inférieur à une valeur conventionnelle maximale : **Cep ≤ Cep_{max}**
- L'indice Tic caractérise la température intérieure conventionnelle du bâtiment qui doit être respectée sans recourir à un système actif de refroidissement. Cette exigence traduit l'exigence relative au confort d'été en imposant que la température la plus chaude atteinte dans les locaux, au cours d'une séquence de 5 jours consécutifs très chauds en été, n'excède pas un certain seuil de référence calculé pour le bâtiment considéré : **Tic ≤ Tic_{ref}**

La détermination du Cep est réalisée poste par poste pour les 5 usages conventionnels¹⁶ de consommation, en partant des besoins, puis en ajoutant les différentes pertes et consommations et en retranchant les apports récupérables pour le chauffage en particulier. Comme indiquée sur la représentation schématique donnée par la Figure 1.8, l'exigence fixée par le Cep_{max} impose, en plus de l'optimisation du bâti exprimée par le $Bbio_{max}$, de recourir à des équipements énergétiques à haut rendement et consommant peu d'énergie primaire.

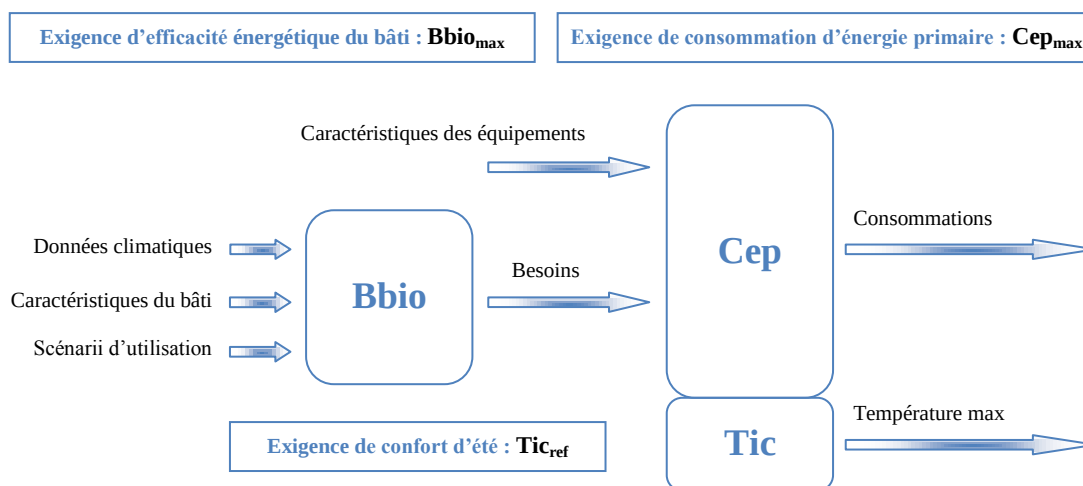


Figure 1.8 : Représentation schématique des 3 exigences de la RT 2012 pour un bâtiment neuf

En moyenne sur le territoire, le Cep_{max} est de $50 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ d'énergie primaire, une valeur absolue plafond qui est utilisée comme référence, sous réserve de modulation, pour l'attribution du label BBC dans le neuf. Les logements collectifs bénéficient quant à eux d'une dérogation provisoire avec un Cep_{max} fixé à $57,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$ jusqu'au 1^{er} janvier 2015. Pour une production locale d'électricité en habitation, le Cep_{max} est majoré de $+12 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$.

Comme illustré sur la Figure 1.9, pour un programme résidentiel neuf respectant la RT 2012 et sur la base d'une consommation d'énergie primaire égale à $50 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$, pour les 5 usages conventionnels, la répartition moyenne est de l'ordre de 15 pour le chauffage et/ou le refroidissement, 25 pour l'eau chaude sanitaire, 5 pour l'éclairage et 5 pour les auxiliaires.

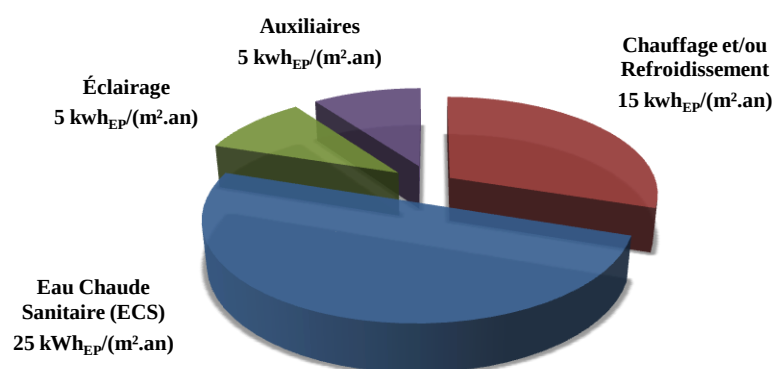


Figure 1.9 : Répartition schématique des consommations par usage dans le résidentiel RT 2012

¹⁶ Les 5 usages conventionnels de consommation : le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et l'alimentation des auxiliaires (pompes et ventilateurs).

La Figure 1.10 donne ensuite l'évolution des consommations moyennes, définies par le Cep en $\text{kWh}_{\text{EP}}/(\text{m}^2.\text{an})$, dans les réglementations thermiques de 2005 et 2012, avec l'objectif de généraliser les bâtiments à énergie positive dès 2020.

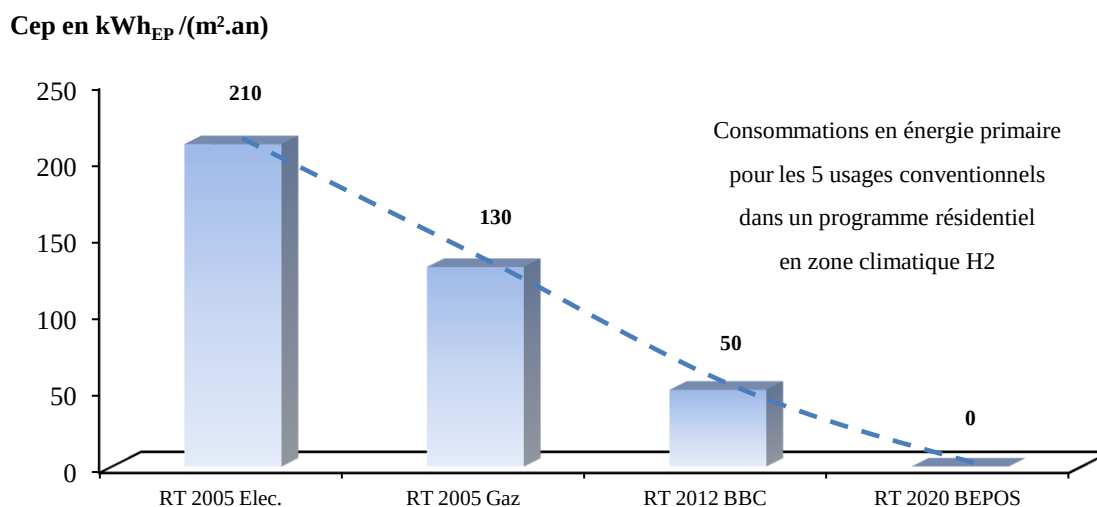


Figure 1.10 : Feuille de route de la réglementation énergétique du bâtiment neuf en France

La RT 2012 établit aussi quelques exigences de moyens qui sont relativement peu nombreuses par rapport aux précédentes réglementations, mais qui jouent le rôle de garde-fous et imposent :

- le recours à un minimum de $5 \text{ kWh}_{\text{EP}}/(\text{m}^2.\text{an})$ d'énergie renouvelable en maison individuelle ;
- le traitement des ponts thermiques $\Psi \leq 0,6 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$ et de l'isolation $U \leq 0,36 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$;
- le traitement de l'étanchéité à l'air contrôlé par le test de la porte soufflante ;
- une surface minimale de baies vitrées d'au moins 1/6 de la surface habitable ;
- la mesure ou l'estimation des consommations d'énergie par usage.

La réglementation thermique (RT) du bâtiment ne se limite donc plus à la seule dimension thermique, car elle concerne également l'énergie, l'environnement et l'économie. L'adoption d'une appellation sans doute plus judicieuse, dite réglementation énergétique (RE) pourrait être effective dès 2012. De plus, des améliorations doivent pouvoir y être progressivement intégrées (procédure du Titre V pour les opérations ou systèmes particuliers) et il existe encore différents paramètres dont il faut mieux tenir compte pour aboutir en 2020 à la réalisation de bâtiments à énergie positive, avec un véritable bilan en CO_2 , en énergie grise¹⁷, en ressources et en coût global [Cardonnel, 2010].

Des contrôles des règles de construction (CRC) doivent aussi être réalisés chaque année sur un échantillon de nouvelles constructions pour sensibiliser l'ensemble des acteurs au respect des règles de construction, des bonnes pratiques professionnelles et à une meilleure qualité des bâtiments. Ils doivent contribuer par ailleurs à améliorer la compréhension des textes réglementaires.

¹⁷ L'énergie grise, exprimée en Tep ou en kWh, est la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie d'un matériau ou d'un produit (conception, extraction et transport, transformation et fabrication, commercialisation, utilisation, valorisation, recyclage ou dégradation) et permet d'en mesurer l'impact sur l'environnement.

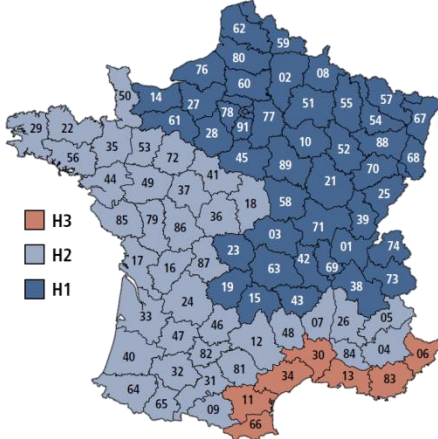
➤ **RT Bâtiments Existants** [Arrêté_RTex, 2007] [Arrêté_RTex, 2008]

La réglementation thermique des bâtiments existants (RT Existant) tient pour but d'assurer une amélioration significative de la performance énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires existants, à l'occasion de travaux de rénovation prévus par le maître d'ouvrage.

Depuis le 31 mars 2008, pour les rénovations lourdes de bâtiments de plus de 1000 m², la réglementation définit un objectif de performance globale pour le bâtiment rénové. Il s'agit alors de la RT Existant « globale ». Le bâtiment est alors assimilé à un bâtiment neuf, et l'objectif est de le mettre en conformité avec la réglementation thermique en cours sur les bâtiments neufs, avec une approche et des objectifs quasiment similaires sur l'ensemble des points. Pour ces bâtiments, le maître d'ouvrage doit également réaliser, avant le dépôt du permis de construire, une « étude de faisabilité » technique et économique des diverses solutions d'approvisionnement en énergie de la construction, pour qu'il lui soit proposé de recourir à des systèmes performants utilisant si possible des énergies renouvelables.

Depuis le 1^{er} novembre 2007 et pour tous les autres cas de rénovation, dans le résidentiel et dans le tertiaire, la réglementation définit une performance minimale pour l'élément remplacé ou installé. Il s'agit de la RT Existant « par élément ». Lors du remplacement ou de l'installation d'un élément d'isolation, des produits permettant d'atteindre des performances supérieures aux caractéristiques minimales mentionnées dans l'arrêté du 3 mai 2007 doivent être installés, comme précisé dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Performance thermique minimale de la paroi après travaux sur existant – R_{min} en m².K/W

Type d'isolation	Vue	H1 et H2	H3 < 800 m	Zones climatiques
Murs en contact avec l'extérieur		2,3 2 si perte surf. hab. > 5%	2	 ■ H3 ■ H2 ■ H1
Rampants de toiture de pente > 60°		2,3	2,3	
Murs au contact d'un local non chauffé		2	2	
Toitures terrasses		2,5	2,5	
Planchers de combles perdus		4,5	4,5	
Rampants de toiture de pente < 60°		4 3 si perte surf. hab. > 5%	4 3 si perte surf. hab. > 5%	
Plancher bas sur extérieur ou sur parking collectif		2,3 réduction possible*	2 réduction possible*	
Plancher bas sur vide sanitaire ou sur local non chauffé		2 réduction possible*	2 réduction possible*	

* selon contraintes de hauteur ou de plancher chauffant

En marge du cadre réglementaire, il existe aussi de nombreuses mesures incitatives, qui sont pour certaines détaillées ensuite. Pour conclure cette partie sur l'existant, il est intéressant d'en citer une exclusivement orientée vers la rénovation. Il s'agit du programme national « Habiter mieux », doté d'un fonds de 1,25 milliard d'euros et géré par l'agence nationale de l'amélioration de l'habitat, qui est destiné à aider 300 000 propriétaires occupants à financer les travaux de rénovation thermique nécessaires pour leur permettre de sortir d'une situation de précarité énergétique.

➤ Diagnostic de Performance Énergétique

Le diagnostic de performance énergétique (DPE) est obligatoire à la construction et à la vente depuis le 1^{er} novembre 2006 et à la location depuis le 1^{er} juillet 2007. Il s'adresse aussi bien aux nouvelles constructions [Arrêté_DPEneuf, 2007] qu'aux bâtiments existants [Arrêté_DPEloc, 2010] [Arrêté_DPEvente, 2010], tant dans le résidentiel que dans le tertiaire, et tous les bâtiments publics sont également concernés depuis le 2 janvier 2008. Valable 10 ans, le DPE est un document de 4 pages qui établit d'une part la consommation énergétique du bâtiment, exprimée en énergie primaire, et d'autre part ses émissions de GES, exprimées en équivalent CO₂. À compter du 1^{er} janvier 2012, 6 mesures complémentaires [DPE, 2011], axées sur une meilleure transparence des résultats, une uniformisation des méthodes de calcul, une formation des diagnostiqueurs mieux adaptée et un contrôle plus efficace de la profession, permettront d'améliorer et de fiabiliser le DPE.

Loin d'être aussi poussé qu'un audit énergétique, le DPE formule néanmoins quelques recommandations sommaires sur les principaux points pouvant être améliorés du point de vue énergétique, tels que l'enveloppe du bâtiment, le chauffage ou encore la production d'eau chaude. La lecture du DPE est facilitée par deux étiquettes, dites « énergie » et « climat » ayant l'obligation d'être affichées sur les annonces immobilières et communiquées lors de toute transaction. Comme le montre la Figure 1.11, ces étiquettes comprennent chacune 7 classes de performance, allant de A à G, qui permettent de qualifier, du meilleur au plus mauvais, le niveau de performance du bâtiment.

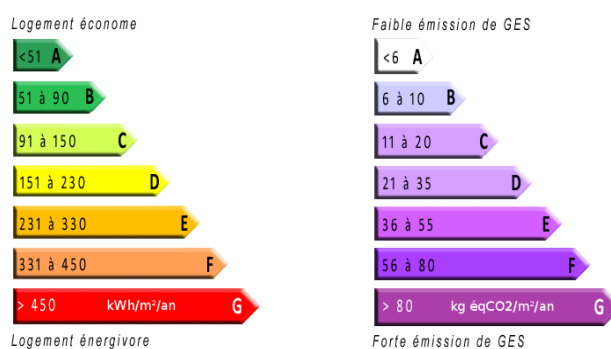


Figure 1.11 : Étiquettes « énergie » et « climat » attribuées dans le cadre du DPE

➤ Choix et remplacement de l'énergie des maisons individuelles [Arrêté_Conduit, 2005]

Dans les projets actuels de construction d'habitation individuelle, le chauffage est très souvent assuré par des convecteurs électriques pour des raisons d'économie à l'investissement. Cependant, malgré une bonne isolation thermique de la construction et la généralisation de la régulation du chauffage, cette solution se caractérise ensuite souvent par des coûts de fonctionnement élevés.

Depuis le 1^{er} septembre 2006, les propriétaires peuvent changer plus facilement de source d'énergie de chauffage avec l'arrêté du 31 octobre 2005 d'application de la loi sur l'air¹⁸ (Article 22), relatif aux dispositions techniques pour le choix et le remplacement de l'énergie des maisons individuelles, qui, si elles sont chauffées à l'électricité, doivent être équipées lors de leur construction, d'un système d'évacuation des fumées vertical permettant le raccordement d'une installation de chauffage à combustible gazeux, liquide ou solide, ou d'un foyer fermé à bois ou à biomasse.

¹⁸ Loi n° 96-1236 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) du 30 décembre 1996

Constatant la timidité et le manque de volonté d'application de l'arrêté du 31 octobre 2005, une circulaire a été émise le 24 juin 2008 pour en préciser les exigences et les modalités d'application. Une réservation dans les planchers hauts et intermédiaires doit ainsi être réalisée pour le passage du conduit, qui doit aller de la souche en toiture au niveau chauffé le plus bas, être marqué CE et désigné T 450 (classe de température¹⁹) et G (résistant au feu de cheminée). Enfin, s'il n'est pas raccordé à un appareil, le conduit doit être obturé par un dispositif spécifique assurant l'étanchéité à l'air.

1.2.2. Prévention des risques sanitaires

En adoptant un mode de vie citadin, l'être humain passe près de 85% de son temps dans des environnements clos, où il est susceptible de connaître une exposition prolongée à de multiples polluants. Ces substances irritantes, allergisantes et parfois même cancérogènes, peuvent être émises par les composants des bâtiments, leurs équipements ou divers éléments de décoration (revêtements, peintures, vernis, colles, adhésifs, meubles...). Ils peuvent également provenir de l'environnement extérieur et de l'activité des occupants.

➤ Valeurs guides de la qualité de l'air intérieur [Anses, 2011]

Depuis 2004, l'Anses²⁰ élabore des valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI²¹) en dressant un état des lieux des expositions aux polluants de l'air présents dans les lieux de vie pour disposer de valeurs repères et positionner les niveaux observés par rapport à des critères sanitaires.

À titre d'exemple, selon une enquête de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) menée sur un échantillon de 567 logements et publiée en novembre 2006, les 18 composés organiques volatils (COV) ayant été mesurés présentent généralement des teneurs plus élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur. Ensuite, près de 10% des logements français peuvent être qualifiés de « multi-pollués », avec de 3 à 8 polluants présents en forte concentration, et dans 87% des cas, les concentrations en formaldéhyde sont supérieures ou égales à 10 µg/m³, la VGAI long terme définie par l'Anses pour une exposition supérieure à 1 an.

➤ Étiquette santé environnementale [Arrêté_COV, 2011] [Décret_COV, 2011]

Parmi l'éventail des mesures de prévention des risques [PNSE, 2009-2013] établies par le Plan National Santé-Environnement (PNSE²²) et pour réduire directement des émissions de polluants à la source, une étiquette santé environnementale est introduite à partir du 1^{er} janvier 2012 pour les nouveaux produits de construction et de décoration mis sur le marché. Son but est d'indiquer, de manière simple et lisible, le niveau d'émission de onze polluants volatils du produit, dont certains en particulier qui peuvent présenter des risques pour la santé tels que le toluène ou le formaldéhyde. Étendue à l'ensemble des produits présents sur le marché en septembre 2013, cette mesure apporte une nouvelle information aux consommateurs et aux collectivités pouvant constituer un critère de sélection en ce qui concerne le choix des produits de construction, de rénovation et de décoration pour l'habitat.

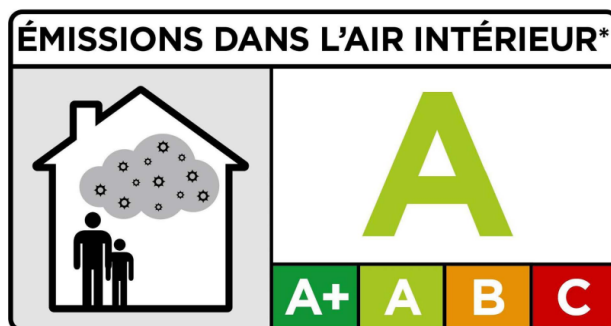
¹⁹ La classe de température indique la température nominale de fonctionnement du conduit qui doit être supérieure ou égale à la température des fumées de l'appareil de chauffage en fonctionnement

²⁰ Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail

²¹ VGAI : Les valeurs guides de la qualité de l'air intérieur sont des cibles sanitaires à atteindre à long terme pour protéger la santé des personnes. Fondées exclusivement sur des critères sanitaires, elles expriment la concentration dans l'air d'une substance chimique, associée à un temps d'exposition.

²² Le premier PNSE était prévu par la loi de santé publique du 9 août 2004 et s'est déroulé sur la période 2004-2008. Le deuxième PNSE s'inscrit dans la démarche générale du Grenelle Environnement sur la période 2009-2013.

Comme le montre la Figure 1.12, la classe de performance des produits utilisés à l'intérieur des locaux est indiquée par une lettre allant de A+ pour de très faibles émissions à C pour de fortes émissions. Le schéma d'une maison contenant un nuage de polluants permet également d'identifier rapidement la qualité du produit.



* Information sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation, sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions)

Figure 1.12 : Étiquette santé environnementale pour les produits de construction et de décoration

➤ **Monoxyde de carbone** [Arrêté_CO, 2009] [Décret_CO, 2008]

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz inodore, incolore, toxique et mortel. Rien ne permet de détecter spontanément sa présence. Sa production résulte d'une combustion incomplète des combustibles organiques, tels que le bois, le charbon, le gaz naturel, le pétrole... Il se diffuse très vite dans l'environnement et agit comme un gaz asphyxiant. Il pénètre dans les globules rouges, se fixe sur l'hémoglobine du sang à la place de l'oxygène et empêche l'oxygénation des cellules. L'intoxication par le CO touche plusieurs milliers de personnes chaque année et constitue la première cause de mortalité accidentelle par gaz toxique en France avec près d'une centaine de décès annuels. Si de rares cas sont liés aux émanations des véhicules, la grande majorité des intoxications surviennent dans les bâtiments, comme le précise l'Institut de Veille Sanitaire [InVS, 2010].

À ce titre et pour une grande majorité des cas, les facteurs d'intoxications domestiques au CO résultent d'une mauvaise évacuation des produits de combustion à cause d'un conduit obstrué ou mal dimensionné, d'un défaut de ventilation des locaux avec des grilles d'aération bouchées, d'une carence d'entretien ou de la vétusté des appareils susceptibles de produire du CO, ou bien encore d'une mauvaise utilisation de certains appareils, comme des appareils de chauffage d'appoint ou des groupes électrogènes utilisés en continu. La Direction Générale de la Santé [DGS, 2009] souligne que deux ou plusieurs facteurs peuvent intervenir dans les accidents, mais que la principale source d'exposition au CO reste le tabagisme actif et passif, créant dans certains cas des intoxications chroniques.

Pour le CO, la valeur limite moyenne d'exposition maximale pour une durée de 8 heures (VME_{max}) est fixée à 10 mg/m^3 par [Anses, 2011] pour garantir une bonne protection de la santé. D'après [INRS, 2005] et [Anses, 2006] les signes cliniques les plus fréquents en cas d'intoxication sont dans 80% des cas des céphalées, i.e. des douleurs locales ressenties au niveau de la boîte crânienne, des vertiges, des nausées ou des malaises. Une exposition plus importante peut provoquer ensuite des troubles neurologiques, des pertes de conscience, des troubles cardiaques et des comas, qui lorsqu'ils n'entraînent pas la mort, laissent des séquelles à vie chez les personnes intoxiquées.

Les mesures initiales de prévention ont ainsi été renforcées, aussi bien dans le neuf depuis le 1^{er} janvier 2009, que dans l'existant depuis le 1^{er} juillet 2010, avec la parution du décret du 27 novembre 2008 relatif à la prévention des intoxications par le monoxyde de carbone et de son arrêté d'application du 23 février 2009, dit « arrêté CO », qui prévoit notamment que la pièce dans laquelle est installé un appareil de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire d'une puissance inférieure ou égale à 70 kW et utilisant les combustibles solides, liquides ou gazeux soit munie :

- d'une entrée d'air permanente directe ou indirecte, dans le cas où l'appareil utilise pour la combustion une partie de l'air de la pièce dans laquelle il est installé ;
- d'un système d'évacuation des produits de combustion satisfaisant aux conditions techniques et de sécurité, et adapté à l'usage, au type d'appareil et au combustible auxquels il est destiné.

De plus, l'entrée d'air permanente et le système d'évacuation doivent être conçus et entretenus de manière à permettre le bon fonctionnement des appareils, sans entrave de la part de l'occupant. L'arrêté CO précise cependant que les pièces dans lesquelles se trouvent des appareils à circuit de combustion étanche ne sont pas concernées par cette réglementation. En effet, par leur conception, ces appareils intègrent le circuit d'amenée d'air comburant et évacuent les produits de combustion vers l'extérieur sans risque de fuite vers l'intérieur des locaux d'habitation.

Régulièrement, des plaquettes d'information à destination du grand public sont élaborées par l'Institut National pour la Prévention et l'Éducation à la Santé [INPES, 2008] pour prévenir des dangers du CO et conseiller les occupants sur les gestes à adopter pour éviter les intoxications.

En outre, l'adoption de la [Loi_DAAF, 2010] rendant obligatoire l'installation de détecteurs avertisseurs autonomes de fumées (DAAF) dans tous les lieux d'habitation est une mesure importante dans la prévention des incendies et des risques liées aux intoxications par les fumées. Conformément aux modalités d'application fixées par le [Décret_DAAF, 2011], la responsabilité de l'installation et de l'entretien d'au moins un DAAF incombe à l'occupant du logement, qu'il soit propriétaire ou locataire. Ainsi, toutes les habitations doivent être équipées pour le 8 mars 2015 d'un appareil qui respecte la norme NF EN 14604, la norme NF 292 et possède le marquage CE (cf. Figure 1.13).



Figure 1.13 : Vue d'un détecteur avertisseur autonome de fumée

➤ **Autres risques** [PNSE, 2009-2013]

Depuis 2004 et la mise en place du premier PNSE, la notion de risque lié à l'environnement bénéficie d'une appréhension globale et de mesures de prévention ciblées. Le volet « Bâtiment et Santé » du Grenelle Environnement s'attache en particulier aux risques de dégradation de la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments, qui dans la plupart des cas (fortes teneurs en radon, en humidité, en polluants volatils ou en CO₂) peuvent être réduits par l'établissement d'une ventilation performante.

1.2.3. Incitations financières

➤ **Contrat de Performance Énergétique** [DIR_EE, 2006]

Le contrat de performance énergétique (CPE) est un instrument financier qui a été introduit par la directive européenne 2006/32/CE relative à l'efficacité et aux services énergétiques²³, et dont le développement permet de favoriser la réalisation des objectifs du Grenelle Environnement. En effet, lorsque des investissements importants sont consentis par un maître d'ouvrage, privé ou public, afin de parvenir à une amélioration notable de l'efficacité énergétique d'un bâtiment, ce contrat établit une garantie de résultats de la part des prestataires, qui s'engagent sur une diminution chiffrée de la consommation énergétique, sous peine d'avoir à indemniser le donneur d'ordre.

➤ **Certificats d'Économie d'Énergie** [Décret_CEE, 2010]

Introduits par la loi de programmation et d'orientation de la politique énergétique (POPE) de juillet 2005, les certificats d'économie d'énergie (CEE) obligent les fournisseurs d'énergie à réaliser des économies d'énergie chez leurs clients sous peine de pénalités. En revanche, si l'objectif qui lui est assigné est dépassé, le fournisseur peut vendre son excédent de CEE entre 0,35 et 0,40 centime d'euro le kWh d'énergie finale cumulée et actualisée sur la durée de vie du produit (kWh cumac), contre une pénalité de 2 centimes sinon. Pour respecter leurs obligations, les fournisseurs d'énergie incitent donc les clients consommateurs à investir dans des équipements économes en énergie, notamment auprès des particuliers dans leur habitat. Suite au succès de la première période 2006-2009 pour laquelle l'objectif de 54 kWh cumac d'économie d'énergie a été dépassé, le gouvernement a prolongé le dispositif pour la période 2010-2013, avec un objectif de 345 kWh cumac d'économie d'énergie.

➤ **Obligation de rachat de l'électricité d'origine renouvelable** [Loi_ElecEnR, 2000]

L'obligation d'achat de l'électricité produite à partir d'énergies renouvelables a été instaurée par la loi du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité, qui prévoit que les diverses installations basées sur l'utilisation d'EnR puissent bénéficier de l'obligation d'achat de l'électricité qu'elles produisent, soit par EDF, soit par des distributeurs non nationalisés. Les tarifs de rachat de l'électricité par source d'EnR sont soumis à évolution et sont régulièrement mis à jours (cf. www.energy.eu/#feedin).

➤ **Crédit d'impôt développement durable** [Arrêté_CIDD, 2010]

La loi de finances pour 2005 a créé un crédit d'impôt en faveur du développement durable valable jusqu'à fin 2012 pour favoriser l'amélioration de la performance énergétique des résidences principales avec la réalisation de travaux d'isolation et l'installation d'équipements de production efficaces utilisant des énergies renouvelables. Sous conditions de performance et de mise en œuvre, cette disposition fiscale proposée dans le neuf et l'existant permet une réduction d'impôt sur le revenu.

➤ **Livret de développement durable** [Décret_LDD, 2007]

C'est un livret de placement qui permet de bénéficier d'un prêt à taux réduit pour la réalisation de travaux d'économie d'énergie ou l'installation d'équipements utilisant des énergies renouvelables.

²³ Cette directive de 2006 vise une baisse de 9% de la consommation d'énergie en Europe sur la période 2008-2016 par la mise en place de mesures d'efficacité et de services énergétiques.

➤ **Exonération de taxe foncière sur les propriétés bâties** [Décret_TFPB, 2009]

Introduite par la loi de finances 2009, l'exonération de taxe foncière sur les propriétés bâties concerne les logements neufs achevés à compter du 1^{er} janvier 2009 ayant obtenu le label BBC. D'une durée minimale de cinq ans, la part de cette exonération (50% ou 100%) et l'éventuelle prolongation de sa durée d'application sont fixées par les collectivités territoriales et les établissements publics de coopération intercommunale, en raison du respect de leur fiscalité propre.

➤ **Éco-prêt à taux zéro plus** [Décret_PTZ+, 2010]

Depuis le 1^{er} janvier 2011, l'éco-prêt à taux zéro plus (PTZ +) remplace trois dispositifs : l'éco-prêt à taux zéro, le pass foncier et le crédit d'impôt sur les intérêts d'emprunts immobiliers. Il permet aux primo-accédants de disposer d'un financement, dont c'est l'État qui paie les intérêts, pour la construction ou l'acquisition d'un logement neuf, ou encore pour la réalisation d'une partie nouvelle de bâtiment. En outre, une majoration est accordée pour toute opération labellisée BBC.

➤ **Labels et majoration du coefficient d'occupation des sols** [Arrêté_COS, 2007]

En 2006, les labels qualifiant les bâtiments à haute performance énergétique (HPE) et très haute performance énergétique (THPE) sont créés. L'extension de ces labels par le suffixe EnR permet d'identifier le recours aux énergies renouvelables dans le bâtiment. Le label BBC reprend quant à lui les valeurs définies par le référentiel de l'association Effinergie®, soit un objectif maximal de consommation d'énergie, mais aussi minimal d'intégration d'EnR. Depuis 2007, une construction neuve ou un agrandissement de l'existant, répondant au label THPE EnR ou BBC-Effinergie, i.e. affichant des performances énergétiques élevées et utilisant des énergies renouvelables, peut bénéficier d'une autorisation de dépassement du coefficient d'occupation des sols (COS²⁴) allant jusqu'à 20%.

➤ **Loi de défiscalisation, ou « loi Scellier »** [Décret_Scellier, 2011]

Effective depuis le 1^{er} janvier 2009, la loi Scellier est un dispositif de défiscalisation qui remplace les dispositifs Borloo et Robien. Elle s'adresse à tous les contribuables qui achètent un bien neuf et s'engagent à le mettre en location pendant une durée minimale de 9 ans (Scellier Classique) ou 15 ans (Scellier Social), avec des loyers réclamés qui ne doivent pas excéder un certain plafond fixé par décret. Depuis le 1^{er} janvier 2010, en droite ligne des accords du Grenelle de l'environnement, les constructions aux normes BBC bénéficient de bonus fiscaux dans le cadre de la loi Scellier BBC.

1.2.4. Information, formation et innovation

➤ **Espaces Info Énergie**

Depuis 2001, des Espaces Info Énergie (EIE) sont créés sur l'ensemble du territoire pour sensibiliser informer et conseiller le grand public gratuitement, de manière neutre et indépendante, sur l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables. Dix ans après leur lancement, le réseau compte environ 245 Espaces Info Énergie répartis dans toute la France et animées par plus de 400 conseillers spécialisés (cf. www.infoenergie.org).

²⁴ Le COS exprime la densité maximale de construction admise sur chaque terrain dans une zone définie.

➤ Observatoire BBC

En octobre 2009, l'Observatoire BBC est créé par l'ADEME, le collectif Effinergie et le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. Il s'agit d'une base de données regroupant différentes opérations labélisées et dont le but est de mutualiser les expériences pour fournir des éléments d'information comparables et un outil d'aide à la décision dans la réalisation d'un projet de bâtiment sobre en énergie (cf. www.observatoirebbc.org).

➤ Dispositif FEEBât

Initié en mars 2008, le dispositif de formation aux économies d'énergie des entreprises et artisans du bâtiment (FEEBât) a déjà touché près de 37 000 professionnels du secteur en juillet 2011. La reconduction et le développement du dispositif jusqu'en 2012 a pour objectif de s'adresser à 120 000 d'entre eux et de systématiser la prise en compte de la dimension énergétique et environnementale dans les travaux de construction et de rénovation, en y assurant la qualité de mise en œuvre et en favorisant le rôle des entreprises et artisans du bâtiment dans la prescription de bouquets de travaux (cf. www.feebat.org).

➤ Réseau inter-clusters

Sous l'impulsion du Plan Bâtiment Grenelle, le rassemblement des différentes structures (clusters, organismes de développement économique, associations, collectivités, etc.) liées à la performance énergétique du bâtiment, à l'éco-rénovation et à la construction durable, forme un « réseau inter-clusters » à l'échelle nationale (cf. Figure 1.14) qui permet d'échanger sur les pratiques, d'accompagner les acteurs du secteur, d'impulser localement des opérations exemplaires, et d'établir des retours d'expériences indispensables à l'ajustement des objectifs et des règles définis par l'État.



Figure 1.14 : Identification du « réseau inter-clusters » à l'échelle nationale

➤ PREBAT

L'objectif du PREBAT est de coordonner les actions de recherche et développement du Plan Bâtiment pour avoir une réhabilitation du parc au meilleur niveau de performance énergétique possible avec la diffusion à grande échelle des meilleures pratiques et technologies existantes, ainsi que pour préfigurer les nouveaux bâtiments à émission nulle de CO₂ avec la réalisation de démonstrateurs à énergie positive utilisant majoritairement des sources renouvelables d'énergie. Dans la continuité du PREBAT 1, un programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment mené sur la période 2005-2009, le PREBAT 2 est une plate-forme nationale de coordination et d'animation de la recherche publique sur l'énergie dans les bâtiments pour la période 2011-2015, engageant 4 ministères et 5 agences nationales : ADEME²⁵, ANAH²⁶, ANR²⁷, ANRU²⁸ et OSEO²⁹ (cf. www.prebat.net).

➤ Plateformes bâtiment énergie [PBG_RA, 2011]

Avec une volonté marquée de promotion de tous les aspects de l'innovation dans le bâtiment [PBG_I&R, 2011] et d'exploitation du potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans ce secteur [PBG_EnR, 2010], le Plan Bâtiment Grenelle porte le projet de création d'un réseau national de « plateformes bâtiment énergie », dont le but est de participer à la mutation du secteur du bâtiment et au développement d'un potentiel économique important sur le plan local. En effet, ces plateformes permettraient de structurer au niveau territorial, la démonstration d'opérations exemplaires, la création et le développement d'entreprises, la formation initiale et continue des professionnels et le transfert de R&D entre les laboratoires et les structures en prises avec les exigences du terrain.

Initiée en 2010 par une phase d'identification des porteurs de projets et de leurs partenaires associés (cf. Figure 1.15), cette opération d'envergure s'attache désormais à finaliser les conditions de mobilisation des financements nécessaires au développement des plateformes et d'organisation de leur fonctionnement en commun. À terme, le but est de disposer d'une dizaine de plateformes thématiques, fonctionnant en réseau et reconnues au niveau européen et mondial.

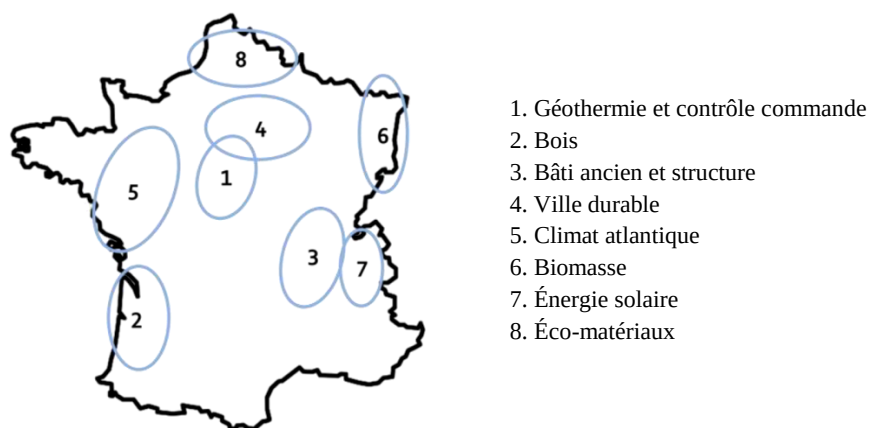


Figure 1.15 : Identification du projet de réseau national de « plateformes bâtiment énergie »

²⁵ ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

²⁶ ANAH : Agence Nationale de l'Amélioration de l'Habitat

²⁷ ANR : Agence Nationale de la Recherche

²⁸ ANRU : Agence Nationale de Rénovation Urbaine

²⁹ OSEO : Pôle financier public de soutien à l'innovation

1.3. BÂTIMENTS À BASSE CONSOMMATION (BBC)

Dans le contexte énergétique et environnemental actuel, le secteur du bâtiment connaît une mutation importante. En effet, il convient de banaliser la très haute performance énergétique et la réduction des émissions de GES dans tout projet de construction ou de rénovation, tout en s'efforçant de maintenir dans le temps le niveau de ces performances. Cet objectif impose alors d'intervenir aussi bien en amont des projets, avec la mise en commun des compétences, la formation et l'adoption d'une démarche concertée de tous les acteurs pour valoriser les meilleures stratégies énergétiques et le choix de systèmes cohérents, qu'en aval, avec des actions de sensibilisation et d'information des occupants pour une meilleure maîtrise des consommations et la redéfinition même du comportement d'utilisateur.

Selon le niveau de performance énergétique qu'il atteint, un bâtiment peut alors être classé dans la catégorie des bâtiments anciens, réglementaires, à basse consommation d'énergie (BBC), à énergie nulle, ou enfin à énergie positive. Dans ce manuscrit, il est choisi de regrouper sous la même appellation générique BBC, l'ensemble des bâtiments dont la consommation d'énergie est très faible, mais pour lesquels il est encore nécessaire de prévoir l'installation de systèmes pour assurer le bien-être des occupants.

À travers le monde, différentes expériences de haute performance et de maîtrise de l'énergie dans le bâtiment ont été entreprises depuis une vingtaine d'années. Trois types de modèles peuvent ainsi être distingués. Le premier donne priorité à une conception basse énergie, avec des bâtiments présentant une forte isolation et une bonne étanchéité à l'air. Le deuxième modèle vise une moindre économie des consommations, mais permet d'atteindre une indépendance énergétique globale par une production importante d'électricité photovoltaïque, comme c'est le cas au Japon par exemple. Le troisième et dernier modèle entend privilégier une diminution des consommations d'énergie associée à la prise en compte de diverses cibles environnementales, privilégiant parfois le caractère sain et confortable du cadre bâti par rapport la performance de l'enveloppe et aux économies d'énergie.

En Europe, les certifications portant sur la performance énergétique des bâtiments sont particulièrement présentes et se développent depuis de nombreuses années, à l'image des labels Minergie et Minergie-P en Suisse ou du standard Passivhaus en Allemagne³⁰. Ces certifications s'élargissent aujourd'hui pour prendre en compte d'autres critères, tels que l'énergie grise des matériaux ou la qualité de l'air intérieur, à l'image de l'extension « Eco » de Minergie.

En France, la généralisation des BBC dans le neuf et l'existant est également en cours, car les pouvoirs publics jugent cette solution pertinente pour contribuer à l'atteinte du « Facteur 4 ». À ce titre, l'habitat individuel est particulièrement concerné, car il représente plus de la moitié des consommations énergétiques et des émissions de GES du secteur du bâtiment. Les réalisations de type BBC intéressent aussi tout particulièrement les occupants, soucieux de conjuguer confort et économie d'utilisation. Enfin, l'évolution des labels vers des niveaux d'exigences encore plus élevés et vers une évaluation multicritère des performances du bâtiment s'opère également en France.

Pour permettre une meilleure compréhension des différentes appellations rencontrées en France pour qualifier des bâtiments neufs et rénovés à usage d'habitation, un exposé de leurs principes, de leurs principales exigences d'attribution et de leur récente évolution est proposé.

³⁰ En 2011, d'après l'association Minergie, environ 22 000 bâtiments ont été certifiés au niveau standard, 1150 suivant l'extension P, 200 suivant l'extension Eco, et 280 suivant l'extension cumulée P-Eco. Les chiffres du Passivhaus Institut estiment le nombre de bâtiments certifiés Passivhaus au niveau mondial à environ 30 000 dont 16 000 en Allemagne.

1.3.1. Point sur les principales appellations

➤ **BBC Effinergie** [Effinergie, 2009]

En France, Effinergie est une association à but non lucratif dont l'objectif est de promouvoir la construction et la rénovation à haute performance énergétique. Effinergie est également la marque d'appellation du label officiel BBC. Le Grenelle Environnement a ensuite repris le référentiel BBC Effinergie en tant qu'objectif pour tous les nouveaux bâtiments dès la fin 2012 (cf. paragraphe 1.2.1).

Pour les bâtiments neufs et les parties nouvelles de bâtiments existants, 5 labels qualifiant des niveaux de performance énergétique sont reconnues [Arrêté_HPEneuf, 2007] sous les appellations HPE³¹, HPE EnR³², THPE³³, THPE EnR³⁴ et BBC 2005. Ce dernier niveau d'exigence reprend les valeurs définies par l'association Effinergie, soit un objectif de consommation maximale en énergie primaire pour les constructions neuves et les parties nouvelles de bâtiment fixé en moyenne à 50 kWh_{EP}/(m².an) pour les 5 usages conventionnels, pondérée ensuite par un coefficient en fonction de la zone climatique et de l'altitude du site. Pour la rénovation de bâtiments à usage d'habitation, l'objectif de consommation maximale est fixé à 80 kWh_{EP}/(m².an) [Arrêté_HPEex, 2009], toujours modulé selon la zone climatique et l'altitude.

Dans le calcul des consommations relatives aux 5 usages, le référentiel autorise de soustraire une certaine quantité d'énergie correspondant à la production d'électricité à demeure, notamment grâce au solaire photovoltaïque. Toutefois, cette déduction est majorée jusqu'à un certain niveau pour éviter que la mise en place d'une production locale d'électricité dans un bâtiment labellisé BBC-Effinergie lui permette par ailleurs de fortement surconsommer de l'énergie.

Les consommations d'énergie sont calculées et affichées en énergie primaire. En France, les coefficients de conversion d'énergie finale en énergie primaire sont de 0,6 pour le bois énergie, 2,58 pour l'électricité et 1 pour les autres sources d'énergie fossiles (fiouls, charbons et gaz). La RT 2012 conserve ces valeurs sauf pour le bois énergie dont le facteur de conversion est porté à 1.

La surface de référence jusque là utilisée par les différentes réglementations thermiques est la Surface Hors Œuvre Nette (SHON). À partir du 28 octobre 2011 et la mise en application de la RT 2012, la SHON est substituée par la Surface Hors Œuvre Nette au sens de la Réglementation Thermique (SHON_{RT}) qui s'affranchit notamment de l'ancienne pondération de 5%.

L'attribution du label BBC Effinergie exige la validation d'un test d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment. En effet, avec l'amélioration de la performance énergétique des constructions, les déperditions d'énergie par renouvellement d'air représentent une part de plus en plus importante dans le bilan des consommations de chauffage. Ce constat favorise ainsi l'essor des systèmes de ventilation, qui intègrent un dispositif de récupération de la chaleur sur l'air extrait, mais nécessite également de limiter les infiltrations d'air parasites qui pourraient constituer des pathologies sur le bâti suite à la condensation à l'intérieur des parois de la vapeur d'eau contenue dans l'air, mais aussi perturber l'efficacité de la ventilation et entraîner une dégradation de la qualité de l'air intérieur et du confort.

³¹ HPE : Haute Performance Énergétique, RT 2005 - 10%

³² HPE EnR : Haute Performance Énergétique, RT 2005 - 10% + EnR

³³ THPE : Très Haute Performance Énergétique, RT 2005 - 20%

³⁴ THPE EnR : Très Haute Performance Énergétique, RT 2005 - 30% + EnR

L'une des méthodes couramment utilisées pour évaluer l'étanchéité de l'enveloppe est celle de la porte soufflante (blower door en anglais) qui consiste à remplacer l'ouverture principale du bâtiment par une fausse porte intégrant un ventilateur pour mettre le bâtiment en dépression, comme représenté par la Figure 1.16 (cf. www.blowerdoor.fr). La porte soufflante et le flux d'air engendré par le ventilateur y sont représentés en rouge. Les flèches bleues provenant de l'extérieur représentent les entrées d'air parasites détectées au niveau des fuites lorsque le bâtiment est mis en dépression. Dans tous ces types de test, une mesure est également réalisée en plaçant le bâtiment en surpression.

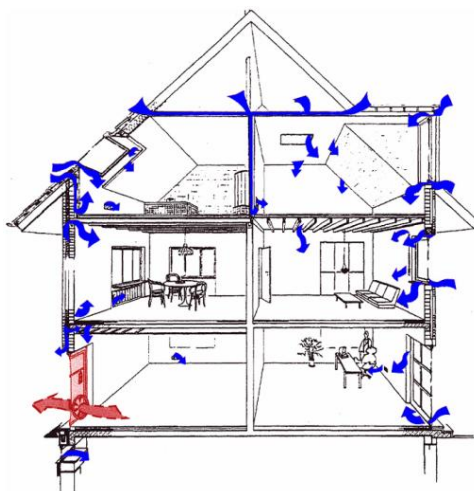


Figure 1.16 : Principe du test d'étanchéité à l'air par la méthode de la porte soufflante

La mesure d'évaluation de l'étanchéité doit être réalisée une fois la construction achevée, conformément à la norme [NF_EN_13829, 2001] et à son guide d'application GA P 50-784, mais il est recommandé d'effectuer un ou plusieurs tests intermédiaires, notamment une fois le bâtiment mis hors d'eau et hors d'air, pour pouvoir corriger les défauts de mise en œuvre le plus tôt possible. Le test consiste en la mise en dépression du bâtiment à 50 Pa avec obturation de toutes les bouches de ventilation, pour déterminer le renouvellement d'air par les fuites d'étanchéité de l'enveloppe. La valeur est ensuite rapportée à la surface de parois froides, hors plancher bas, telle que définie dans la réglementation, puis une interpolation est réalisée pour ramener le résultat à une mise en dépression équivalente de 4 Pa. Pour un bâtiment neuf, la valeur $Q_{4Pa-surf}$ ainsi obtenue relativement aux parois froides sous une pression différentielle de 4 Pascals doit être inférieure à $0,6 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ pour une maison individuelle et inférieure à $1 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ pour des logements collectifs. En rénovation, ces valeurs sont respectivement portées à $0,8 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ et $1,3 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$.

En neuf comme en rénovation, les certificateurs habilités à délivrer le label BBC Effinergie sont CEQUAMI pour la maison individuelle en secteur diffus, PROMOTELEC pour les bâtiments résidentiels individuels et collectifs, CERQUAL PATRIMOINE pour les logements collectifs et l'individuel groupé et CERTIVEA pour les bâtiments tertiaires. La certification comprend les vérifications techniques du projet avant construction, les contrôles de mise en œuvre, la détection des erreurs et la délivrance du label. À titre d'exemple, l'obtention du label BBC Effinergie pour une maison individuelle est facturé aux environs de 400 € TTC. Au 1^{er} juillet 2011, en totalisant l'ensemble des opérations labellisées en secteurs diffus, groupés et collectifs, le label BBC Effinergie a été attribué à près de 13 500 logements neufs et environ 2 200 logements rénovés. De plus, la tendance à la labellisation est exponentielle depuis 2 à 3 ans, avec un facteur d'évolution des demandes de certification compris entre 10 et 15 entre 2011 et 2012.

Pour respecter les exigences énergétiques imposées par le label BBC Effinergie, les bâtiments visés doivent donc respecter des valeurs d'isolation, détenir une enveloppe étanche à l'air et disposer d'un système de ventilation performant. Mais les techniques de construction, les matériaux et les énergies utilisées, ainsi que l'aspect architectural des bâtiments sont laissés au libre choix du maître d'ouvrage. À l'exception de quelques gardes fous à respecter, le label BBC Effinergie s'intéresse donc uniquement aux performances énergétiques du bâtiment et il peut être souligné que les consommations des appareils domestiques ne sont pas prises en considération.

➤ **BBC+ et BEPOS Effinergie** [Effinergie, 2011]

Le référentiel BBC+ et BEPOS Effinergie disponible depuis avril 2011 tient pour objectif de dépasser le référentiel BBC actuel et fait partie des contributions dans le cadre des travaux menés dans le cadre des futurs labels de la RT 2012. Les principales améliorations introduites visent à atteindre :

- une consommation réduite en moyenne à $40 \text{ kWh}_{\text{EP}}/(\text{m}^2.\text{an})$ pour les 5 usages conventionnels, toujours pondérée par un coefficient en fonction de la zone climatique et de l'altitude du site ;
- une étanchéité à l'air de l'enveloppe $Q_{4\text{Pa-surf}}$ réduite à $0,4 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ en maison individuelle ou accolée et à $1,0 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ en bâtiment collectifs d'habitation ;
- une évaluation certifiée des débits de ventilation, justifiant qu'ils ne diffèrent pas de plus de 10% des débits calculés et un contrôle de l'étanchéité minimale des réseaux ;
- une évaluation systématique de la consommation des autres usages de l'électricité, notamment de celle des appareils domestiques, par un dispositif de comptage analysant chaque usage ;
- une évaluation de la production locale d'électricité d'origine renouvelable, permettant au bâtiment d'être qualifié de producteur d'électricité ou d'être à énergie positive.

Cette extension du label BBC Effinergie laisse ainsi présager des futures évolutions de la certification des bâtiments à haute performance énergétique et l'association Effinergie sera sans doute amenée à formuler de nouvelles propositions dans les mois et les années à venir pour continuer d'être une force de proposition utile aux prochaines réglementations.

➤ **BBC Prioriterre** [Prioriterre, 2011]

Prioriterre est une organisation non gouvernementale sous statut associatif. Applicable depuis le 5 septembre 2011, le label BBC Prioriterre concerne la certification des bâtiments de type logements collectifs ou individuels neufs situés en France métropolitaine. C'est un label BBC de conception globale du bâtiment qui reprend strictement les exigences imposées par l'arrêté HPE du 3 mai 2007. Il a été développé dans l'idée de proposer une alternative à Effinergie et de donner une solution aux maîtres d'ouvrage souhaitant également labelliser leur opération Minergie tout en bénéficiant des aides liées au BBC en France. Le coût de la certification Minergie France s'élève toutefois à 3000 € TTC pour un habitat de 100 à 120 m². Le label BBC Effinergie peut également être attribué à condition de réaliser et de valider la mesure d'étanchéité à l'air du bâtiment prévue par ce label.

Comme indiqué dans le Tableau 1.2, les deux seules exigences à respecter pour obtenir le label BBC Prioriterre sont de totaliser au moins 125 points parmi les exigences environnementales du référentiel technique qui sont réparties en 8 pôles et obtenir un minimum de 90 points dans les 7 premiers pôles. Il est à noter qu'il n'y a pas d'obligation de résultat minimum par pôle et les points supplémentaires du pôle Bonus ne sont pas obligatoires.

Tableau 1.2 : Répartition des points par pôle et exigences pour l'attribution du label BBC Prioriterre

Pôle	Points	Exigences
1. Analyse du site	35	Pas d'exigence minimum pour chaque pôle Exigence totale de 90 points pour les 7 premiers pôles
2. Conception du bâtiment	35	
3. Gestion de chantier	35	
4. Ressources « durables »	35	
5. Confort de l'occupant	30	
6. Gestion des déperditions énergétiques	30	
7. Dispositions spécifiques à l'électricité	35	
8. Bonus	200	Exigence totale minimum de 125 points

Les 20 points liés au test d'étanchéité à l'air du bâtiment sont inclus dans le pôle Bonus et ne conditionnent donc pas l'attribution du label, mais pour être attribués, les résultats doivent présenter une valeur $Q_{4Pa-surf}$ inférieure à $0,32 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$, ou un taux de fuite n_{50} inférieur à 1 vol/h sous 50 Pa, relativement à la surface habitable (SHAB).

➤ **Démarche HQE** [HQE, 2009]

Depuis 1990, la démarche de Haute Qualité Environnementale (HQE), vise à maîtriser de manière globale les impacts des bâtiments sur leur environnement extérieur. C'est une démarche volontaire de management de la qualité environnementale des opérations de construction ou de réhabilitation des bâtiments, qui prévoit notamment l'amélioration de leur performance énergétique, mais concerne au total 14 cibles regroupées en 4 catégories, comme présenté dans le Tableau 1.3.

Pour respecter la démarche HQE et prétendre au label, un bâtiment doit atteindre au minimum 3 cibles au niveau de base, 4 cibles au niveau performant et 7 cibles au niveau très performant. En revanche, le choix des cibles est laissé au maître d'ouvrage, qui peut donc définir ces priorités comme il l'entend, à la seule exception du respect de la cible énergétique, qui doit atteindre le niveau performant pour tous les bâtiments dont le permis de construire a été obtenu après le 1^{er} mars 2009.

Tableau 1.3 : Inventaire des 14 cibles regroupées en 4 catégories de la démarche HQE

Éco-Construction	Éco-Gestion
1. Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat	4. Gestion de l'énergie
2. Choix intégré des procédés et produits de construction	5. Gestion de l'eau
3. Chantier à faibles nuisances	6. Gestion des déchets d'activité
	7. Gestion de l'entretien et de la maintenance
Confort	Santé
8. Confort hygrothermique	12. Qualité sanitaire des espaces
9. Confort acoustique	13. Qualité sanitaire de l'air
10. Confort visuel	14. Qualité sanitaire de l'eau
11. Confort olfactif	

De plus en plus décisive pour l'obtention d'un marché de travaux, la démarche HQE® suppose ainsi le respect de contraintes écologiques à tous les stades du projet. En outre, sous l'impulsion du Grenelle Environnement, la démarche initiale s'oriente vers une extension répondant à l'appellation HQE Performance et devant être finalisée pour décembre 2012. La démarche HQE Performance tient alors pour ambition d'évaluer tous les types de bâtiments dans une perspective de développement durable, en proposant un affichage normalisé et facilement lisible de leurs performances, tel que le « Passeport Bâtiment Durable » [HQE, 2011]. Elle repose pour cela sur 3 grands thèmes d'évaluation :

- énergie et environnement : indicateurs environnementaux globaux normalisés...
- santé et confort : qualité de l'air intérieur, confort acoustique, confort thermique d'été...
- économie : coût global, coût d'entretien...

La démarche HQE Performance apparaît ainsi comme l'extension nécessaire à la démarche actuelle pour permettre son harmonisation, au moins au niveau européen. En effet, des certifications étrangères telles que LEED³⁵ (américaine) ou BREEAM³⁶ (anglaise) octroient une note globale permettant de comparer plus aisément plusieurs bâtiments certifiés entre eux. La démarche HQE est quant à elle plus complète mais nécessite de se référer à la performance des 14 cibles du profil environnemental de la construction pour établir une comparaison entre deux bâtiments certifiés.

➤ **Certification H&E [QUALITEL, 2008]**

Introduite en 2003 par l'Association QUALITEL, la certification Habitat & Environnement (H&E) est une démarche qui prend en compte la préservation de l'environnement tout au long du cycle de vie du logement. S'adressant aux seuls immeubles d'habitation collectifs et aux logements individuels groupés, elle constitue un outil permettant aux maîtrises d'ouvrage d'atteindre et de démontrer la performance environnementale de leurs opérations de construction de logements.

Pour afficher la certification Habitat & Environnement, il est nécessaire de satisfaire à au moins 6 des 7 thèmes environnementaux identifiés et les thèmes 1, 3 et 7 sont systématiquement retenus. Pour le thème non retenu, des exigences minimales restent néanmoins à respecter. Regroupés en trois catégories, comme le montre le Tableau 1.4, les sept thèmes comprennent deux thèmes organisationnels, quatre thèmes techniques et un dernier thème lié à l'information et à la communication pédagogique à réaliser auprès des particuliers et des gestionnaires d'opération.

Tableau 1.4 : Répartition en 3 catégories des 7 thèmes de la certification H&E

Catégorie	Thème	Dénomination
Organisation	n°1	Management environnemental de l'opération
	n°2	Chantier propre
Technique	n°3	Énergie – Réduction de l'effet de serre
	n°4	Filière constructive – Choix des matériaux
	n°5	Eau
	n°6	Confort et santé
Information	n°7	Gestes verts

³⁵ LEED : Leadership in Energy and Environmental Design

³⁶ BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment

Par ailleurs, différentes options de certification sont également disponibles pour accéder aux labels réglementaires en cours liés à la performance énergétique des bâtiments, notamment celui de BBC Effinergie. Enfin, à partir de novembre 2011, la certification H&E prévoit étoffer et faire évoluer son référentiel en y intégrant des fiches d'interprétation et de complément (FIC). Une évolution importante concerne également les vérifications in situ, qui viseront les demandes en cours à cette date et les nouvelles demandes de certification.

➤ **Minergie** [Minergie, 2010]

Créé en 1998 en Suisse, la certification Minergie s'applique aux bâtiments neufs ou existants, résidentiels ou tertiaires. Il est délivré en France par l'organisme certificateur Prestaterra. Dans sa version standard, le label Minergie conseille mais n'impose pas la réalisation d'un test d'étanchéité à l'air de l'enveloppe. Le bâtiment doit néanmoins afficher une consommation d'énergie primaire inférieure à $38 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ en neuf et $60 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ en rénovation, pour les 3 usages principaux que sont le chauffage/refroidissement, l'ECS et la ventilation, tout en maîtrisant le niveau des investissements. En effet, pour aller dans le sens d'une diffusion du label à grande échelle et pour éviter les compensations abusives, comme un bâtiment non isolé mais recouvert de panneaux photovoltaïques, Minergie impose un surcoût maximum de 10% par rapport à une construction conventionnelle équivalente. Naturelle ou mécanique, une ventilation contrôlée est aussi obligatoire pour assurer la pérennité de l'ouvrage et le confort des occupants. À ce titre, le confort thermique d'été doit pouvoir être justifié et enfin, suivant la catégorie de bâtiment et le niveau de certification visé, des exigences supplémentaires concernent la production de chaleur, le froid et l'éclairage. Les 3 principes de base qui caractérisent un bâtiment Minergie sont :

- une enveloppe étanche à l'air présentant une excellente isolation thermique ;
- une ventilation contrôlée permettant une aération douce et automatique ;
- une production de chaleur adaptée et efficace favorisant les énergies renouvelables.

Pour garantir la performance finale des bâtiments labellisés, la certification Minergie s'appuie sur la formation des professionnels, des procédures qualité, des contrôles aléatoires sur chantier, ainsi qu'un suivi des consommations et des comportements d'utilisation pendant 3 ans.

Les extensions possibles au label Minergie standard sont Minergie-Eco (écologique) introduit depuis 2006, Minergie-P (passif) depuis 2009, et Minergie-A (autonome) depuis 2011. Les versions cumulées des extensions sont également possibles, telles que Minergie-P-Eco ou Minergie-A-Eco.

Le label Minergie-P s'applique à une conception de bâtiment spécifique orientée vers une très faible consommation énergétique, à l'image du standard allemand Passivhaus, mais qui maintient aussi de fortes exigences de confort et de rentabilité. Pour les 3 usages conventionnels identifiés par le label, la consommation en énergie primaire dans l'habitat individuel ou collectif neuf et ancien doit cette fois rester inférieure à $30 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ et la puissance de chauffage doit être inférieure à $10 \text{ W}/\text{m}^2$. Ensuite, la mise en place de fenêtres à triple vitrage devient nécessaire pour respecter les exigences de performance de l'enveloppe, dont les éléments de parois opaques et vitrées doivent respectivement présenter un coefficient de transmission surfacique $U_{PO} < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ et $U_{PV} < 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Le recours aux EnR est également obligatoire, ainsi que l'installation de luminaires et de lampes à basse consommation, ou encore l'utilisation exclusive d'appareils électroménagers de classe A et même A+ pour le réfrigérateur. Toutefois, les solutions techniques retenues ne doivent pas présenter un surcoût supérieur à 15% par rapport aux matériaux et aux systèmes conventionnels comparables.

Avec la certification Minergie-A, le bâtiment doit présenter une consommation d'énergie primaire proche de zéro, conformément au développement des Nearly Zero Energy Buildings (NZE) programmé par l'Union Européenne à travers la directive PEB de 2010. Les besoins d'énergie restants du bâtiment doivent être intégralement couverts par la production d'énergie d'origine renouvelable. Une valeur de consommation inférieure à $15 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ est acceptée pour les constructions ayant recours à un système utilisant la biomasse et relié hydrauliquement à une installation solaire thermique couvrant au moins 50% des besoins de chaleur. En outre, le contrôle de l'étanchéité est obligatoire pour l'obtention des labels Minergie-P ou Minergie-A. Le taux de fuite de l'enveloppe mesuré sous une différence de pression de 50 Pa doit alors être inférieur à 0,6 vol/h.

Minergie propose aussi une extension Eco permettant de qualifier les constructions saines et écologiques. Un bâtiment Minergie-Eco est constitué de matériaux à faible impact environnemental, c'est-à-dire nécessitant peu d'énergie grise, lui permettant de consommer jusqu'à 3 fois moins d'énergie primaire qu'une construction traditionnelle pour un fonctionnement pendant 30 ans.

L'évolution du label Minergie montre ainsi que la démarche vise à la fois l'efficacité énergétique de la construction, avec la possibilité de la rendre totalement indépendante, le confort d'habitation et la rentabilité de l'opération, tout en ayant la possibilité de prendre en compte les aspects santé et cycle de vie du bâtiment.

➤ **Passivhaus** [PHI, 2011]

Par définition, les bâtiments d'habitation répondant au standard Passivhaus (maison passive) permettent d'assurer un climat intérieur confortable en été comme en hiver sans avoir recours à un système conventionnel de chauffage ou de refroidissement. Élaboré en Allemagne dès 1988 par l'institut Wohnen und Umwelt (habitat et environnement) de Darmstadt en collaboration avec l'Université de Lund en Suède, le concept de maison passive a ensuite donné naissance au standard Passivhaus, dont le référentiel de certification défini en 1996 par le Passivhaus Institut de Darmstadt sous l'impulsion du Dr. Wolfgang Feist est toujours en vigueur.

Délivré par le Passivhaus Institut de Darmstadt en Allemagne et depuis octobre 2007 via l'association La Maison Passive France dans l'Hexagone, le standard Passivhaus s'applique aux bâtiments neufs ou existants et repose sur le respect de 3 critères qui imposent :

- une consommation de chauffage en énergie finale inférieure à $15 \text{ kWh}_{EF}/(\text{m}^2.\text{an})$,
ou une puissance surfacique de chauffage inférieure à $10 \text{ W}/\text{m}^2$;
- une perméabilité à l'air de l'enveloppe inférieure à 0,6 vol/h sous 50 Pa ;
- une consommation totale en énergie primaire inférieure à $120 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$.

Les critères doivent être calculés avec le logiciel Passive House Planning Package (PHPP) et s'appliquent quelles que soient l'altitude et la zone climatique du projet considéré. La consommation totale en énergie primaire inclut l'ensemble des usages, y compris ceux liés à l'utilisation des appareils électrodomestiques. Pour respecter de si faibles critères de consommation énergétique, l'installation d'un système de récupération de chaleur à haute efficacité sur l'air extrait de ventilation est quasiment inévitable et sous ces conditions, l'énergie qui est dissipée par les habitants, l'éclairage et les appareils domestiques suffit seule à maintenir une température agréable à l'intérieur du logement. Toutefois, un appoint de chauffage pour les journées très froides est généralement prévu sur l'air de ventilation qui est alors utilisé comme unique vecteur de chauffage compte tenu de la très faible puissance demandée.

Dans le standard Passivhaus, la consommation maximale d'énergie autorisée pour le chauffage est évaluée de sorte à maintenir la température de l'habitation à 20°C, relativement à la surface intérieure nette du bâtiment, appelée Treated Floor Area (TFA) et spécialement définie [Feist, 2001] pour permettre la comparaison entre les opérations menées par les 5 pays du projet CEPHEUS.

À l'instar des labels Minergie ou Minergie-P, les exigences et recommandations du label Passivhaus ont conduit à l'élaboration de solutions standards pour une conception et une construction particulièrement soignées, dont les principales d'entre elles sont reportées au sein du Tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Principales recommandations pour le respect des critères du standard Passivhaus

Recommandations	Caractéristiques
Orientation	Sud, conception bioclimatique et compacité ≈ 40% des déperditions couvertes par les gains solaires passifs
Isolation	Par l'extérieur pour éliminer les ponts thermiques
Parois opaques	$U \leq 0,15 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ et si possible $U \leq 0,11 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$
Parois vitrées et huisseries	$U \leq 0,8 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ $g > 0,5$ et protections solaires pour le confort d'été
Traitement des ponts thermiques	$\psi \leq 0,01 \text{ W/(m.K)}$
Préchauffage de l'air neuf	Puits canadien Température de sortie $\geq 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Ventilation	Système de ventilation à double flux à fluides séparés et rendement $\geq 80\%$ Consommation électrique relative à la ventilation $\leq 0,4 \text{ Wh/m}^3$ d'air transporté
ECS	Capteurs solaires thermiques intégrés et/ou pompe à chaleur
Équipements	Classe d'efficacité des appareils électrodomestiques : A ou A+ Choix d'appareils sans veille et usage de lampes à basse consommation
Consommation totale d'énergie finale	Systèmes efficaces de production d'énergie pour le chauffage, l'ECS et les USE

Notations : U : Coefficient de transmission thermique surfacique

ψ : Coefficient de transmission thermique linéique

g : Facteur solaire des vitrages

Particulièrement exigeant, le label Passivhaus tient pour but de s'établir comme un standard à l'échelle de l'Europe à travers sa diffusion et son adaptation pour différents climats. À ce titre, entre 1998 et 2001, le programme Cost Efficient Passive Houses as European Standards (CEPHEUS) a permis de financer des réalisations en Allemagne, en Autriche, en France, en Suisse et en Suède, avec pour objectif de démontrer la faisabilité technique, la rentabilité et la reproductibilité de ce type de bâtiment, tout en respectant les particularités constructives de ces 5 pays. Puis, entre 2005 et 2007, le projet européen de recherche et de diffusion d'information Passive-On Project a permis d'établir les conditions de développement de ce type de logements dans les climats chauds. À présent, le standard Passivhaus est délivré dans les 27 pays de l'Union Européenne via des associations dédiées. En France, le coût moyen d'une certification Passivhaus est d'environ 1500 € TTC pour une maison individuelle, auquel s'ajoute le prix du test d'étanchéité à l'air de l'enveloppe qui s'élève à environ 500 € TTC. Compte tenu du niveau élevé des exigences du standard Passivhaus, il est plus difficile d'y inscrire des opérations de réhabilitation du patrimoine bâti... mais cela reste néanmoins possible.

➤ Comparaison entre appellations

Comme le montre le Tableau 1.6, il est impossible et même risqué de chercher à comparer les différentes appellations entre elles, car elles ne sont pas basées sur les mêmes critères et ne tiennent pas compte des mêmes exigences. Plusieurs différences peuvent ainsi être soulignées, au niveau :

- des surfaces prises en compte pour l'évaluation des consommations ;
- des températures de confort à atteindre à l'intérieur de la construction ;
- des facteurs de conversion d'énergie finale en énergie primaire par type d'énergie ;
- des usages pris en compte dans l'évaluation des consommations ;
- des exigences d'étanchéité à l'air de la construction ;
- de la prise en compte du surcoût de la construction ;
- de la prise en compte de l'énergie produite par les installations intégrées utilisant des EnR...

Tableau 1.6 : Inventaires des principales différences entre diverses appellations pour une habitation neuve

Appellations		Minergie			Effinergie		Passivhaus
Construction d'une habitation neuve en 2011							
Niveau de l'appellation		Standard	P	A	BBC	BBC+	Standard
Surface de référence		Surface de Référence Énergétique			SHON	SHON _{RT}	TFA ≈ SHAB
Température de référence		20°C			19°C		20°C
Facteur de Conversion kWh _{EP} / kWh _{EF}	Élec.	2,0			2,58		2,6
	Bois	0,7			0,6	1,0	0,2
	PVsol	- 2,0			1,0		0,7
Consommation énergétique annuelle en kWh _{EP} /(m².an)		Q _{h,li} < 38	Q _{h,li} < 30	Q _{h,li} < 0*	< 50**	< 40**	< 120
Chauffage		< 0,9.Q _{h,li}	< 0,6.Q _{h,li}	< 0,9.Q _{h,li}	Contrôlée Évaluée		< 15 kWh _{EF} /(m².an)
ECS							
Ventilation							
Éclairage		-					
Ventilation		douce et automatique					
Appareils domestiques		-			-		
Perméabilité à l'air de l'enveloppe***	Q _{4Pa-surf} m³/(h.m²)	-	< 0,16		< 0,6	< 0,4	< 0,16
	n ₅₀ vol/h	-	< 0,6		< 3	< 2	< 0,6
Maîtrise du surcoût		< 10%	< 15%	-	-	-	-
Recours aux EnR		Contrôlée Évaluée			-	Évaluée	-

* Valeur tenant compte de la production énergétique d'origine renouvelable.

** Valeur modulée selon la zone climatique et l'altitude.

*** Les équivalences entre $Q_{4Pa-surf}$ et n_{50} sont données à titre indicatif.

Les cases grisées indiquent les usages qui sont pris en compte.

1.3.2. Caractéristiques générales des BBC

Les différences entre les programmes exposés précédemment portent essentiellement sur le niveau d'ambition visé en matière de performance énergétique de l'enveloppe, sur le traitement des consommations et de la production d'électricité, ainsi que sur la prise en considération de la maîtrise des coûts et des problématiques de réhabilitation. Lors de la réalisation d'un bâtiment de type BBC, l'optimisation et la gestion de la question énergétique peut alors s'effectuer suivant différentes voies d'actions ayant recours à des techniques et des technologies plus ou moins sophistiquées. Toutefois, la démarche généralement adoptée pour réaliser un BBC peut être synthétisée en un concept commun à toutes les opérations et qui repose sur le respect de la triade suivante :

- Réduire au minimum l'ensemble des besoins énergétiques
- Produire efficacement le complément d'énergie nécessaire
- Recourir aux énergies renouvelables dès que cela est possible

Comme le montre la Figure 1.17, ce triptyque de solutions peut être résumé en 3 termes simples et évocateurs respectant un ordre de priorité d'action et formant une démarche applicable à tous les secteurs consommateurs d'énergie dans la société. C'est l'objectif de l'association Négawatt, créée en 2001 et rassemblant près de 450 membres et 200 professionnels de l'énergie, qui élabore et actualise régulièrement un scénario [Négawatt, 2011] visant la réduction des consommations d'énergie d'origine fossile et nucléaire, en se basant sur des propositions de mesures concrètes et pragmatiques, qu'elle soumet aux responsables concernés, ainsi qu'aux décideurs politiques et économiques.

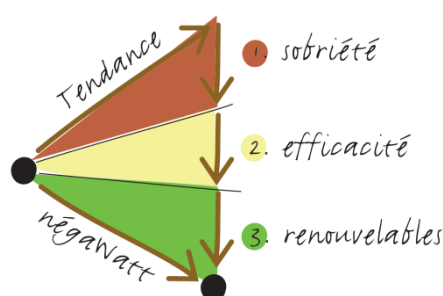


Figure 1.17 : Démarche globale du scénario Négawatt

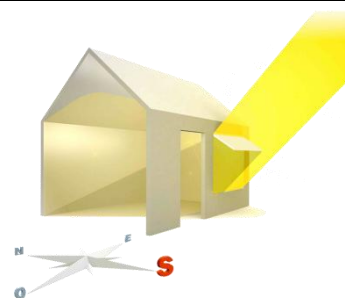
À travers leur récente évolution, les habitations de type BBC, telles qu'entendues dans ce manuscrit et telles que décrites précédemment, se caractérisent principalement par une consommation très faible en énergie, mais aussi par l'utilisation de systèmes efficaces pour couvrir les besoins restants, notamment grâce à des solutions de production énergétique d'origine renouvelable. Le concept des BBC [Effinergie, 2008] correspond ainsi en tout point aux 3 caractéristiques de sobriété, d'efficacité et de recours aux EnR, qui peuvent ensuite se décomposer suivant 6 grands principes, dont les 3 premiers sont relatifs au bâti et les 3 autres aux systèmes, comme détaillé dans le Tableau 1.7.

Dans cette démarche, la conception des BBC passe alors généralement par des considérations architecturales bioclimatiques, par le traitement du confort d'été au moyen de solutions passives, par la réalisation d'une enveloppe garantissant à la fois une isolation élevée, une forte étanchéité à l'air et la suppression des ponts thermiques, ainsi que par l'installation de systèmes de récupération, de gestion et de production d'énergie à haute efficacité, basés de préférence sur l'exploitation de sources d'origine renouvelable, telles que le solaire, l'éolien, l'eau, la géothermie ou encore la biomasse.

Tableau 1.7 : Inventaire des 6 grands principes de conception d'un BBC

1. Bioclimatisme

Conception compacte du bâtiment et disposition rationnelle des pièces avec zonage des activités. Orientation favorable par rapport à la course du soleil, valorisation des apports passifs (solaires ou interne) par le captage et le stockage de la chaleur. Protection contre les surchauffes d'été par des débords de toiture adaptés, des protections solaires amovibles et la plantation d'arbres à feuilles caduques au sud. Recours à une ventilation traversante pour le rafraîchissement passif du bâtiment. Valorisation de la lumière naturelle.



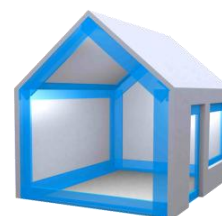
2. Isolation

Réalisation d'une enveloppe présentant de très faibles pertes thermiques par transmission. Suppression des ponts thermiques, de préférence grâce à une isolation par l'extérieur ou au moyen de rupteurs. Conjugaison de parois opaques et vitrées à fort pouvoir isolant. Adoption de vitrages à basse émissivité pour maîtriser les déperditions par rayonnement tout en conservant un apport intéressant de lumière naturelle.



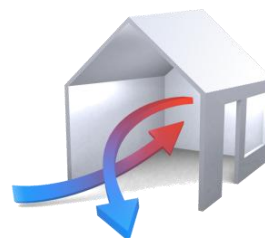
3. Étanchéité

Réduction importante, voire extrême des déperditions d'énergie intempestives dues aux infiltrations ou aux exfiltrations d'air incontrôlées, véritables ponts aérauliques dans l'enveloppe, pouvant fortement dégrader la performance thermique de l'enveloppe, voire créer des zones de pathologies du bâti en cas de point de fuite isolé. Contrôle de l'étanchéité à l'air de la construction.



4. Ventilation

Mise en place d'une ventilation efficace pour alimenter continuellement en air neuf les zones occupées et évacuer l'air vicié des zones d'activité et de services. Distribution des débits hygiéniques pour la bonne qualité de l'air intérieur et le confort des occupants. Utilisation préférentielle d'un système à haute efficacité avec récupération de chaleur sur l'air extrait et équipé d'un appoint pour utiliser l'air comme unique vecteur de chauffage.



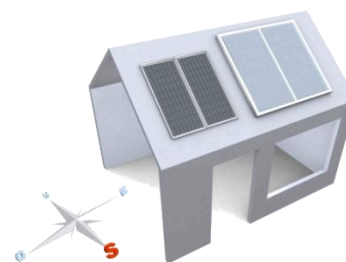
5. Équipements

Choix d'équipements électroménagers et électriques de confort et de loisirs à basse consommation. Réduction possible de la consommation d'électricité de l'habitation jusqu'à 50% par rapport à des usages non contrôlés, sans pertes de confort ni de satisfaction pour les utilisateurs. Utilisation d'appareils de classe A et A+, de dispositifs de coupure des veilles, d'eau chaude sanitaire pour le lave-linge et le lave-vaisselle, de lampes économiques...



6. Production

Installation de systèmes de production de chaleur et d'électricité à haute efficacité, le plus possible ayant recours aux énergies renouvelables. Choix et dimensionnement adaptés des systèmes pour couvrir les besoins sans chercher à les dépasser. Généralisation de l'utilisation de capteurs solaires thermiques intégrés pouvant satisfaire de 40 à 60% les besoins en eau chaude sanitaire. Choix de systèmes de production électrique robustes en raccordement direct avec stockage performant ou sur réseau. Affichage de l'énergie produite.



1.3.3. Solutions techniques associées

Il existe aujourd'hui sur le marché de nombreuses solutions techniques adaptées aux exigences des BBC. Le Tableau 1.8 regroupe en trois catégories quelques unes des différentes solutions techniques couramment mises en œuvre dans ce type de bâtiments (liste non exhaustive).

Tableau 1.8 : Inventaires de quelques solutions techniques couramment rencontrées dans les BBC

Catégories	Exemple de solutions techniques couramment employées
<i>Techniques constructives & passives</i>	• Orientation des pièces en fonction des activités et du taux d'occupation • Débords de toiture fixes ou amovibles, stores, volets, persiennes... • Masques végétaux, construction semi-enterrée... • Isolation de forte épaisseur (> 30 cm), par l'extérieur, répartie... • Rupteurs de ponts thermiques • Films et rubans d'étanchéité, kits de jonction étanches • Double et triple vitrages gaz rare et basse émissivité • Inertie thermique élevée, matériaux à changement de phase (MCP) • Murs Trombe, stockage en sous sol, parois parietodynamiques • Ventilation traversante (free-cooling), puits enterrés... • Récupération et valorisation de la lumière (puits) et le l'eau de pluie (cuves)
<i>Techniques de production de récupération & de distribution</i>	• Chaudières gaz à condensation, bois à bûches ou à pellets (fioul haut rendement) • Pompe à chaleur (PAC) depuis l'air, le sol ou l'eau vers l'air ou l'eau (COP > 3) • Système de ventilation à double flux à récupération de chaleur (VMC2F), avec échangeur à haute efficacité, moteurs basse consommation, régulation, by-pass, dégivrage, maintien hors gel, couplage à un puits enterré • Unités compactes : ECS-ventilation-chauffage-rafraichissement regroupant les systèmes Sol.Th - VMC2F – PAC réversible • Inserts et poêles au bois à bûches ou à pellets • Micro cogénération au gaz ou au bois énergie • Capteurs solaires thermiques (Sol.Th) • Capteurs solaires photovoltaïques (Sol.Pv) • Éoliennes individuelles (Système de rafraichissement évaporatif direct, indirect, à dessiccation...)
<i>Techniques d'usages</i>	• Équipements électroménagers, bureautiques et de loisirs de classe A ou A+ • Limitation et/ou régulation de l'éclairage artificiel, lampe à basse consommation • Limitation des veilles, mise en place d'un interrupteur minuteur commun • Consommation raisonnée de la ressource eau • Comportement rationnel des occupants et gestion maîtrisée des systèmes

Le choix des solutions techniques à retenir dans un bâtiment de type BBC n'est donc pas figé et dépend également fortement de la nature de la réalisation. En effet, certains dispositifs ne peuvent être envisagés que dans le cas d'une construction neuve ou sont difficilement rentables dans une démarche de réhabilitation. Une opération de type BBC ne peut toutefois atteindre des performances optimales que si l'ensemble de sa conception et de sa réalisation est parfaitement cohérent. Il est dès lors impératif de s'appuyer sur une démarche globale de projet valorisant tout d'abord à limiter les déperditions par une isolation thermique élevée, une forte étanchéité à l'air et une absence de pont thermique, puis à valoriser les apports passifs solaires et internes, et enfin à favoriser l'utilisation de systèmes de production efficaces, en parallèle ou combinés, basés sur l'exploitation d'une ou plusieurs source(s) d'origine renouvelable.

Alors que le concept de BBC n'impose pas de systèmes constructifs particuliers [Effinergie, 2008], il reste conditionné en pratique par le choix de solutions technico-économiques viables, la qualification des professionnels en charge de l'exécution de l'opération sur le chantier, le contrôle de la réalisation, la sensibilisation des occupants et le suivi régulier des consommations. Le respect de cette démarche est l'unique garante d'une opération performante dans la durée qui assure à la fois un climat intérieur sain et une très faible consommation d'énergie.

1.3.4. Procédure de choix liée au chauffage

Comme représenté sur la Figure 1.18, la procédure de choix du type de vecteur, de la source et du système énergétique de chauffage d'une opération de type BBC est une étape importante dont les modalités et les critères sur lesquelles elle repose ont sensiblement évolués.

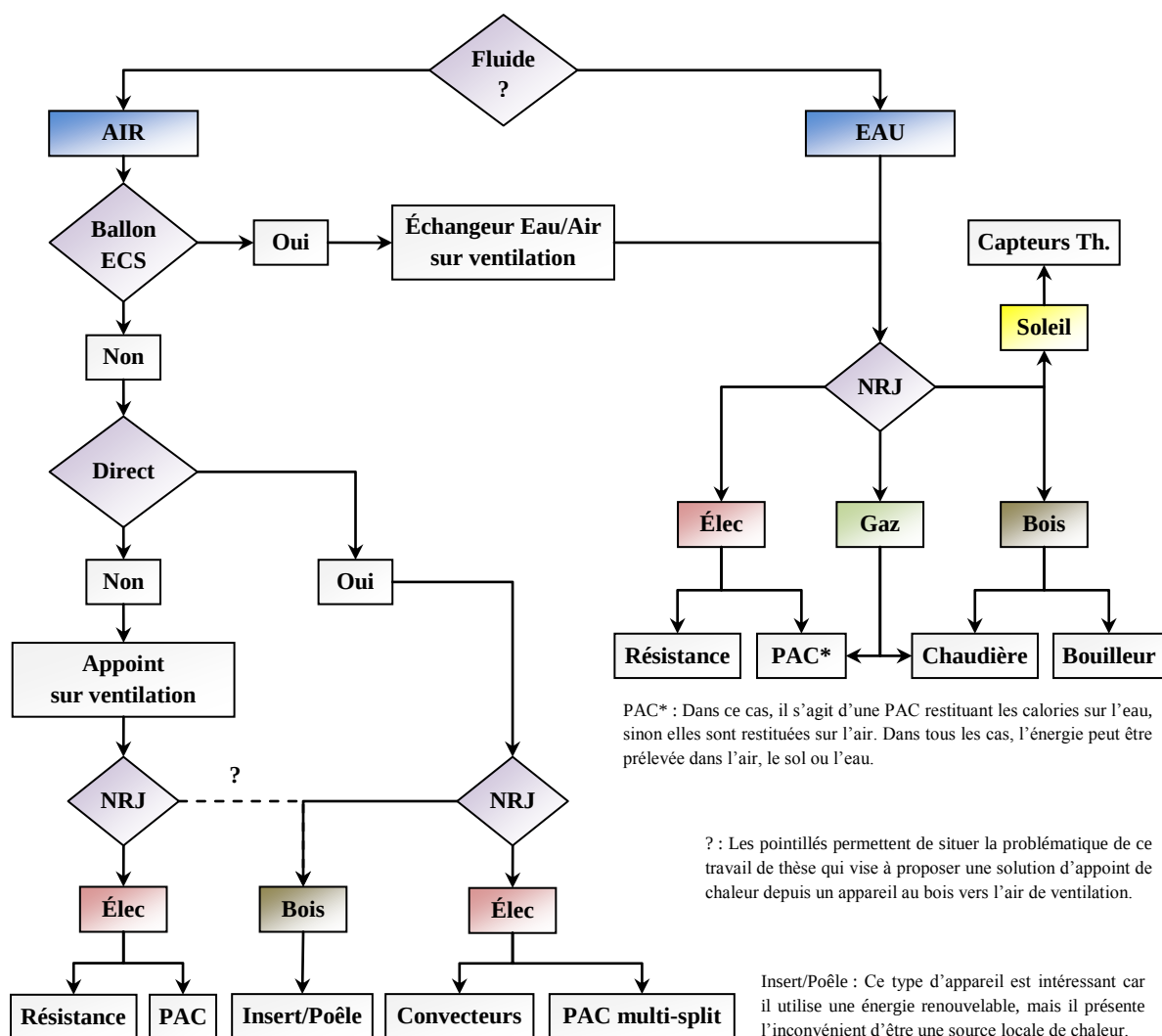


Figure 1.18 : Choix du vecteur, de la source et du système énergétique de chauffage pour un BBC

Le choix de l'air ou de l'eau comme vecteur de chauffage est tout d'abord à considérer. En effet, lorsque le bâtiment possède encore des besoins importants de chauffage, les systèmes composés d'émetteurs à basse température, de type plancher chauffant, reliés au dispositif de stockage de l'ECS et alimentés par une PAC ou tout autre équipement à haute efficacité apparaissent tout à fait adaptés.

Dans les opérations les plus performantes, le besoin de chaleur est si faible qu'il devient alors possible de s'affranchir de tout système de chauffage conventionnel et d'avoir recours au seul vecteur air pour distribuer les calories au sein du bâtiment. En termes de coûts, cette possibilité possède l'avantage conséquent d'économiser la mise en place d'un réseau complet et des émetteurs associés. La procédure de choix, telle qu'elle est proposée sur la Figure 1.18, s'oriente alors vers la partie gauche de l'organigramme.

Dans le cas où le ballon de stockage de l'ECS est connecté au dispositif de chauffage du bâtiment, des systèmes ayant recours au soleil, au bois, au gaz ou à l'électricité (PAC) peuvent être utilisés pour élever la température de l'eau, qui circule ensuite dans un échangeur eau/air et réchauffe l'air de ventilation insufflé dans les différentes pièces. Dans ce cas, la procédure de choix des sources et des systèmes énergétiques est identique à celle d'un chauffage utilisant l'eau comme vecteur énergétique. Ce type de solutions combinées présente l'avantage d'utiliser le ballon d'ECS pour stocker l'énergie produite par des systèmes qui présentent sinon bien souvent des puissances trop élevées par rapport aux seuls besoins de chauffage d'une réalisation de type BBC.

Lorsque le chauffage de l'air de l'habitation est toujours assuré de manière indirecte, c'est à dire en utilisant l'air de ventilation insufflé dans les différentes pièces, mais cette fois-ci sans lien avec le ballon de stockage de l'ECS, l'électricité apparaît être la seule source énergétique utilisable, soit au moyen d'une simple résistance électrique, soit à l'aide d'une PAC. D'autres solutions utilisant un système de type appoint solaire et permettant de réchauffer l'air de ventilation entrant dans le bâtiment pourraient être envisagées, mais elles souffrent de difficultés de disponibilité, de contrôle en puissance et de régulation et constituent encore des solutions isolées, au stade d'étude.

Le dernier cas est celui du chauffage direct de l'air des différentes pièces du bâtiment. Les seuls systèmes utilisables sont alors les convecteurs électriques, les PAC multi-split et les appareils de chauffage domestique au bois de type insert ou poêle. L'énergie utilisée est donc l'électricité ou le bois. À l'heure actuelle, les systèmes électriques bénéficient encore des avantages de leur faible coût d'investissement et de leurs larges possibilités de régulation, mais leur coût d'exploitation élevé et leur bilan dégradé en énergie primaire en font des solutions quasi-inadaptées aux nouvelles et futures opérations de type BBC, en neuf comme en rénovation. En revanche, l'utilisation d'un système basé sur le bois énergie apparaît tout à fait prometteuse à condition d'opter pour un appareil de faible puissance pour éviter le risque de surchauffe dans la pièce où il est installé. L'inconvénient majeur de ce type de systèmes vient alors du fait qu'ils constituent une source locale de chaleur et qu'il est souvent difficile d'établir des températures homogènes dans l'ensemble des pièces du bâtiment.

Ce dernier constat, associé à la volonté de récupérer une partie de la puissance émise par un appareil de chauffage au bois pour constituer un appoint de chaleur sur l'air de ventilation, constitue la problématique principale du travail réalisé dans le cadre de cette thèse.

De manière générale, à travers l'analyse menée sur la procédure de choix liée au chauffage des BBC, il apparaît que les « solutions packagées » offrent une réponse appropriée aux spécificités de ce type de bâtiments. Leurs principaux facteurs de développement portent ensuite sur leurs conditions d'intégration technique, leurs possibilités d'autonomie, de commande, de régulation et de robustesse. En effet, la relation bâtiment - installation - occupant est un critère essentiel qui conditionne le respect des performances prévues à l'étape de la conception. Les occupants doivent ainsi adopter un comportement adapté à la maîtrise des usages énergétiques et doivent en cela être accompagnés par la mise en place de dispositifs ergonomiques d'affichage et de contrôle de leurs consommations.

1.4. CHAUFFAGE AU BOIS

Les forêts couvrent 31% des surfaces émergées de la planète, rassemblent 80% de la diversité des espèces animales et végétales terrestres recensées et contribuent directement à la vie d'1,6 milliard de personnes dans le monde au travers des nombreuses activités qui en dépendent, qu'elles soient environnementales, économiques, culturelles ou récréatives.

1.4.1. Potentiel de la ressource bois

➤ Une ressource abondante disponible localement

L'exploitation forestière raisonnée, telle qu'elle est pratiquée en France et en Europe, assure le développement durable des espaces boisés. En effet, la forêt se fragilise lorsqu'elle n'est pas ou mal entretenue et les risques d'incendies augmentent, d'où l'importance d'une bonne gestion de ces espaces par le ramassage des résidus et des branches issues de l'abattage des arbres, appelés aussi rémanents. Cette ressource peut alors être utilisée pour alimenter des appareils de chauffage au bois, plutôt que d'être de toute façon évacuée ou brûlée sur place pour entretenir le domaine forestier.

Les résultats des travaux de l'Inventaire Forestier National (IFN), présentés sur la carte de la Figure 1.19, montrent que le taux moyen de boisement pour la France s'établit à près de 30%, avec des variations allant de 5% dans la Manche à plus de 60% dans le Var [IFN, 2010]. La forêt française couvre donc près d'un tiers du territoire après 150 ans de croissance continue et sa stabilisation entre 2008 et 2009, sous l'effet de l'urbanisation principalement. Par ailleurs, la récolte annuelle de bois représente moins de 70% de la production biologique de la forêt, qui est de 59 millions de mètres cubes par an (Mm^3/an). Ainsi, en adoptant une gestion durable des domaines forestiers, le volume de bois prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt et préserve ainsi la ressource sur pied.

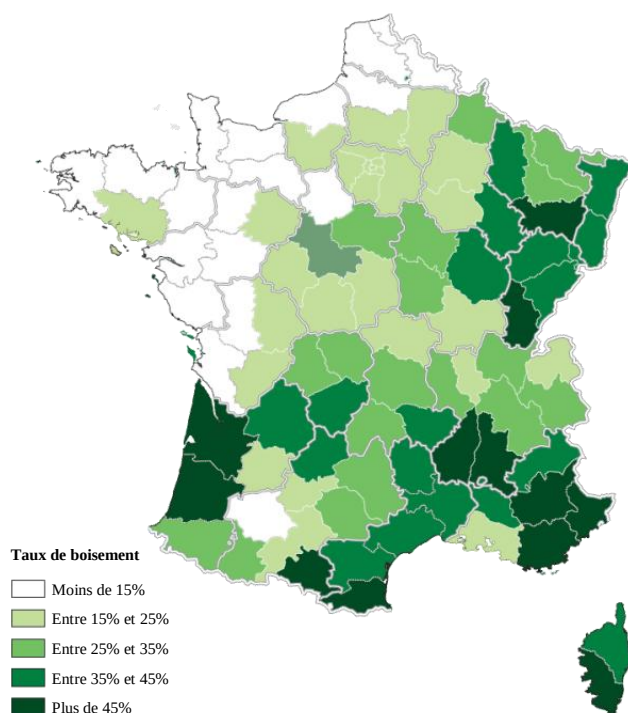


Figure 1.19 : Taux de boisement de la France par département en 2009

La question de l'exploitation et de la valorisation des rémanents (branches, bois cassés ou dégradés) est particulièrement cruciale après les épisodes de tempêtes, comme celle de décembre 1999 qui a renversé environ 140 millions de m³ de bois répartis sur 500 000 ha de forêts en France, ou encore la tempête Klaus de janvier 2009, pendant laquelle 42 millions de m³ de bois ont été abattus. Le défi d'une gestion raisonnée de ce volume de bois supplémentaire est alors relevé par l'ensemble de la filière et par l'État au moyen d'actions planifiées et d'aides financières mises en œuvre par l'ADEME. La récupération, le stockage et l'utilisation prioritaire du bois issu des zones sinistrées pour la production d'énergie, permettent ainsi de limiter la chute des prix de vente de la ressource.

➤ **Une ressource renouvelable hautement valorisable**

Neutre au regard de l'effet de serre, la ressource bois est une énergie renouvelable dont le recours est incontournable pour répondre aux engagements politiques de développement des EnR. En effet, il est admis que la quantité de CO₂ libérée dans l'atmosphère lors de la combustion du bois est équivalente à celle qui a été prélevée pendant sa croissance. Cette transmission de carbone entre la biosphère et l'atmosphère constitue le cycle du carbone (cf. Figure 1.20).

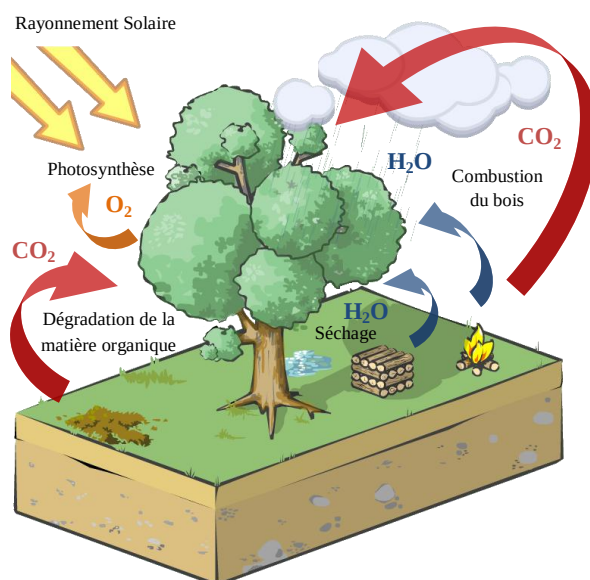


Figure 1.20 : Cycle du carbone pour la ressource bois

En outre, si la matière ligneuse n'est pas brûlée, sa dégradation naturelle sous l'effet des micro-organismes provoque sa décomposition en dioxyde de carbone et en méthane, ce dernier ayant une contribution à l'effet de serre 21 fois plus importante que celle du CO₂. Renouvelable dans un temps court et présentant des émissions nettes de CO₂ faibles comparativement aux énergies fossiles, l'utilisation du bois énergie, à raison d'un volume de 4 m³ environ, permet ainsi d'éviter l'emploi d'1 tonne de pétrole et le rejet de 2,5 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère.

En termes socio-économiques, la filière bois génère environ 450 000 emplois, dont la grande majorité concerne les métiers de transformation et de mise en œuvre du bois et dont moins de 15% ont trait au bois énergie, avec principalement les métiers relatifs à la production du combustible bois en amont et à la fabrication des appareils de chauffage en aval. D'après l'ADEME, la création de 25 000 emplois supplémentaires est pressentie d'ici 2015 dans la filière bois énergie, du fait de son essor.

➤ **Un usage bois matériau**

En 2007, le Grenelle Environnement soulignait l'importance de produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité par l'adoption d'une démarche territoriale concertée et la gestion multifonctionnelle des forêts. Depuis 2010, le Plan Bâtiment Grenelle favorise quant à lui l'utilisation exclusive de bois certifiés ou issus de forêts gérées de manière durable dans les constructions bois.

Dans ce contexte et d'après une étude récente [Xerfi_Bois, 2011], les mises en chantier de maisons en bois en France ont plus que doublé sur la décennie 2000-2010, avec près de 15 000 constructions bois pour la seule année 2008. La poursuite et l'amplification de cette tendance est également prévue avec, une nouvelle fois, le doublement des réalisations en 2015. En effet, le marché de la construction bois est soutenu par une forte demande des particuliers pour un habitat sain et écologique, une législation favorable au bois matériau dans la construction [Décret_Bois, 2010] et des aides gouvernementales en faveur du développement durable. L'étude précise que l'ossature bois est la solution constructive retenue dans les trois quarts des cas et que la standardisation de la production tend à réduire la durée de montage et le coût global de l'habitation, qui reste néanmoins encore supérieur de 10 à 20% à ceux d'une construction réalisée en maçonnerie.

Laissant présager un conflit d'usage autour du bois, certains professionnels des métiers liés à l'usage du bois matériau s'inquiètent des difficultés d'approvisionnement qu'ils rencontrent depuis 2010 et pointent du doigt l'essor du bois énergie nécessaire à l'atteinte des objectifs de production d'énergie d'origine renouvelable en 2020. Toutefois, la forêt française reste sous-exploitée et des volumes significatifs de sous-produits de l'industrie du bois restent encore à valoriser, d'autant que les prélèvements des filières bois matériau et bois énergie ne portent pas sur les mêmes éléments de la ressource, comme le précise un récent rapport sur la mise en valeur de la forêt française et le développement de la filière bois [Puech, 2009]. En conclusion, ce rapport conditionne l'optimisation de l'exploitation du potentiel de la ressource bois par la nécessité de conforter, d'organiser, de moderniser et d'industrialiser la filière.

➤ **Un usage bois énergie**

La France est le premier pays consommateur de bois énergie en Europe en valeur absolue, et le 6^{ème} relativement à sa population, avec environ 0,15 tep/an consommée par habitant, essentiellement pour le chauffage domestique au bois. En volume, cela représente une consommation totale de bois énergie d'environ 40 Mm³/an, dont 25 Mm³ sont prélevés en forêt (bûches et plaquettes forestières) et 15 Mm³ sont issus de sous-produits de l'industrie du bois (écorces, copeaux et sciures, plaquettes, granulés, briquettes), de la filière des déchets (bois mis au rebut) et d'exploitation rurale.

En valeur énergétique de référence, cette consommation finale de bois énergie s'établit à 8,9 Mtep en 2009, ce qui représente environ 3% du total de l'énergie consommée au niveau national. D'après les chiffres de [ADEME_Bât, 2011], le secteur du bâtiment en consomme 6,9 Mtep, soit plus des trois quarts (78%) et le résidentiel s'attribue quant à lui sans partage 6,5 Mtep de cette ressource, principalement pour le chauffage domestique, ce qui représente pas moins de 15% du total des 42,8 Mtep d'énergie finale consommée par l'ensemble de ce sous secteur.

Depuis 1994, l'utilisation du bois énergie est soutenue par l'ADEME, avec la mise en place du Plan Bois Énergie et Développement Local (PBEDL) qui touche en particulier les secteurs collectifs et tertiaires. Puis, le Plan National Bois Énergie [PNBE, 2000-2006] suivi du Programme National

Biomasse Énergie [PNBE, 2007-2010], ont permis en dix ans d'améliorer l'efficacité des usages domestiques du bois énergie, de développer les investissements structurants dans les secteurs collectif, tertiaire et industriel, ainsi que d'organiser la mobilisation des ressources, notamment en développant l'exploitation des plaquettes forestières issues des rémanents, dont le gisement énergétique par département est détaillé sur la carte de la Figure 1.18 [IFN, 2005].

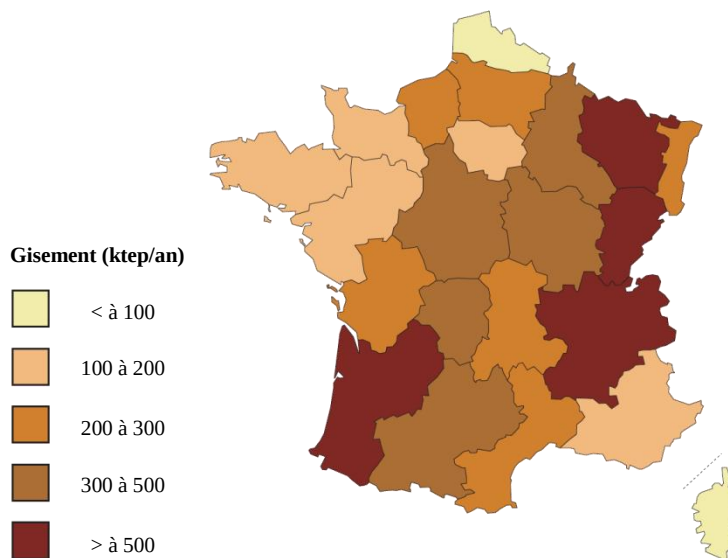


Figure 1.21 : Gisement énergétique issu des rémanents de l'exploitation forestière en 2004

À l'échelle de la France, les résultats des études menées par l'IFN sur la disponibilité du bois énergie évaluent que le gisement énergétique total issu des rémanents représente 7,3 Mtep/an. D'après ces mêmes études, l'intensification des prélèvements rendrait accessible un gisement complémentaire d'environ 4,9 Mtep, mais ce supplément resterait encore difficilement mobilisable à un coût économique concurrentiel vis-à-vis d'autres types d'énergie et ne doit pas déstabiliser les autres usages du bois (bois d'industrie, bois d'œuvre, chimie verte...).

1.4.2. Chauffage domestique au bois

➤ Situation et développement [ADEME_Bois_NRJ, 2009]

Aujourd'hui, près de 6 millions de ménages sont équipés d'un appareil de chauffage au bois, cheminée exclue, utilisé la plupart du temps en complément d'une autre source d'énergie. Le bois énergie est même utilisé en chauffage de base dans près de 100 000 logements, essentiellement des maisons individuelles. Enfin, depuis 10 ans, le marché des appareils de chauffage domestique au bois français est le plus important d'Europe, avec entre 450 000 et 500 000 pièces vendues par an.

Favorisé par la gestion raisonnée et durable d'une ressource neutre en carbone, la mise sur le marché d'appareils performants sur le plan énergétique et environnemental, les efforts de qualification des professionnels du secteur et la structuration territorialisée de la filière, le développement du chauffage domestique au bois énergie séduit de plus en plus les consommateurs et s'impose comme une voie d'action indispensable à l'atteinte des objectifs du Grenelle Environnement.

En effet, d'ici à 2020, le Grenelle Environnement [Comop_n°10, 2008] prévoit d'augmenter le nombre de logements chauffés au bois de 6 à 9 millions, tout en conservant la même consommation de bois énergie par rapport à 2006, soit 7,4 Mtep. Cet objectif, qui semble tenable au vu des 6,5 Mtep actuellement consommées pour le chauffage domestique au bois, intègre à la fois l'augmentation des performances des appareils et leur renouvellement prévu dans près de quatre millions de logements.

Par ailleurs, le développement du chauffage domestique au bois est porté ces dernières années par la hausse des prix des énergies fossiles. En effet, peu soumis aux fluctuations des cours des carburants et des monnaies, ce mode de chauffage est le plus économique, que ce soit pour un chauffage d'appoint ou pour le chauffage principal. Ainsi, avec un coût de l'ordre de 4cts €/kWh, le chauffage domestique au bois énergie concurrence directement l'usage des pompes à chaleur (PAC), reste plus économique que l'usage des ressources fossiles traditionnelles, telles que le fioul ou le gaz, et s'avère même deux fois plus compétitif que l'usage du propane ou de l'électricité [Prix_NRJ, 2011].

➤ Principales formes du combustible bois

Comme le montre la Figure 1.22, le bois énergie, qui désigne les applications du bois en tant que combustible, se présente principalement sous quatre formes distinctes :

- Les *bûches de bois*, qui sont vendues en stères tas de 1 m x 1 m (bûches de 1 m), 1 m x 0,80 m (bûches de 0,50 m) ou 1 m x 0,70 m (bûches de 0,30 m) et utilisées dans les inserts, foyers fermés et chaudières manuelles. Les résineux et les feuillus tendres (épicéa, pin, peuplier...) brûlent plus vite que les feuillus durs (chêne, hêtre, frêne...) que l'on recharge moins souvent.
- Les *plaquettes forestières* et les copeaux, qui sont vendus en vrac et sont couramment utilisés pour alimenter les chaudières automatiques de moyenne et forte puissance. Issu de branchages broyés, ce combustible bois sèche en 2 à 4 mois et sa longueur est comprise entre 2 et 5 cm.
- Les *briquettes de bois*, qui sont vendues sous forme de bûchettes reconstituées d'environ 20 cm de longueur et peuvent être utilisées dans tout type d'installation (foyer fermé, insert, poêle, chaudières manuelles et automatiques). Affichant un taux d'humidité très faible, elles sont essentiellement composées des résidus de scierie.
- Les *granulés de bois*, aussi appelés pellets, qui sont vendus en vrac ou en sacs de 15 à 20 kg et dont l'usage est prévu indifféremment dans toute installation automatisée. Il s'agit de petits cylindres de 6 à 10 mm de diamètre et de 10 à 50 mm de longueur, constitués uniquement de sciure compressée à haute pression (plus de 100 bars) sans aucun additif ni agent liant. Ce combustible très sec (moins de 10% d'humidité) possède un fort pouvoir calorifique inférieur (PCI), de l'ordre de 4,8 kWh/kg, donnant un excellent rendement lors de sa combustion.



Bûches



Plaquettes



Briquettes



Granulés

Figure 1.22 : Vues des différentes formes du combustible bois énergie

➤ **Pouvoir calorifique du combustible bois** [ADEME_Bois_PCI, 2001]

Le pouvoir calorifique représente l'énergie contenue dans une unité de masse du combustible utilisé. En pratique, on distingue le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un combustible. Le PCS donne le dégagement maximal théorique de chaleur, y compris la chaleur de condensation de la vapeur d'eau produite pendant la combustion, tandis que le PCI n'inclut pas cette chaleur de condensation. La technologie permettant la récupération de la chaleur par la condensation de la vapeur d'eau des fumées étant très peu diffusée en France, surtout pour un usage domestique, le PCI est la valeur théorique couramment utilisée pour le bois énergie.

La valeur de l'humidité du combustible³⁷ est alors un critère essentiel pour déterminer son PCI. En effet, pour obtenir une bonne combustion, la faible teneur en humidité du bois est recherchée. Un bois venant d'être abattu, puis fendu doit ainsi être conservé sous abri dans un endroit bien ventilé pendant un an au minimum pour optimiser sa combustion. En revanche, mal stocké, tout combustible bois se dégrade rapidement.

À titre d'exemple, une bûche de bois sèche prête à l'emploi contenant 20% d'humidité environ présente un PCI de 4,1 kWh/kg en moyenne, tandis qu'un bois fraîchement coupé dont l'humidité est proche de 45% affiche seulement un PCI moyen de 2,6 kWh/kg, soit une capacité à délivrer de la chaleur diminuée de près d'un tiers. Avec une humidité comprise entre 5 et 10%, les briquettes de bois et les granulés de bois possèdent les valeurs de PCI les plus élevées, i.e. entre 4,5 et 5,5 kWh/kg. C'est un facteur déterminant qui contribue au développement important que connaît l'usage de ces formes nouvelles de bois énergie.

➤ **Taux de fines**

Résidus des opérations de transformation et de transport du bois, les fines sont les particules qui présentent une taille inférieure à 2 mm. Un taux de fines important dans le combustible augmente le taux de poussières émises dans les fumées, qui s'il est trop important (supérieur à 5%) engendre des dysfonctionnements de l'appareil de chauffage (encrassage du conduit, difficultés de régulation...)

➤ **Marquage « NF Biocombustibles solides »** [NF444, 2010]

Le marquage NF est une démarche volontaire de certification, demandée par les fabricants et délivrée par l'Association française de normalisation (AFNOR). Le logo NF atteste ainsi qu'un produit est conforme à des caractéristiques de qualité définies dans les normes françaises, européennes ou internationales. Depuis décembre 2010, le nouveau marquage « NF Biocombustibles solides » remplace les anciennes marques « NF Bois de chauffage » et « NF Granulés biocombustibles ». Il garantit à l'utilisateur la qualité du combustible acheté, à travers sa provenance, ses dimensions et son niveau d'humidité notamment, devant ainsi permettre un fonctionnement optimal de l'installation de chauffage. Le charbon de bois, les briquettes de charbon de bois et les briquettes biocombustibles sont également intégrés à ce référentiel.

En attendant une harmonisation européenne des normes qui caractérisent la qualité des granulés de bois, certains producteurs français présentent de manière volontaire sur le marché des produits qui affichent également le respect des exigences des normes allemandes DIN et DIN plus.

³⁷ Dans le domaine du bois énergie, l'humidité du combustible est généralement son humidité sur brut, qui est définie comme le rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse totale du bois.

➤ Principaux types d'appareil

Il existe différents équipements permettant de produire de la chaleur à partir de la ressource bois. Quatre catégories d'appareils peuvent ainsi être distinguées en fonction de leur rendement :

- les foyers ouverts ou cheminées : rendement de l'ordre de 10%,
- les foyers fermés et les inserts : rendement de 70% à 85% pour des appareils récents,
- les poêles : rendement de 70% à 85% pour des appareils récents,
- les chaudières : rendement de 70% à 95%

Compte tenu de leur très faible rendement, les cheminées à foyer ouvert, équipées ou non d'un récupérateur de chaleur, ne sont pas considérées comme des appareils de chauffage domestique à proprement parlé. En effet, la chaleur produite est presque intégralement évacuée à l'extérieur par le conduit de fumée et l'important tirage de ce type d'installation favorise les entrées d'air incontrôlées au sein de l'habitation. L'appellation « appareils indépendants de chauffage domestique au bois » regroupe ainsi les seuls foyers fermés, inserts, poêles et chaudières fonctionnant au moyen d'un combustible solide au bois. Les chaudières cuisinières bois, dont l'utilisation connaît un fort déclin mais qui étaient très répandues dans les campagnes autrefois, permettent le chauffage d'une ou de plusieurs pièces et sont également comptabilisées dans cette catégorie. En revanche, considérées comme des systèmes d'agrément, les cheminées à foyer ouvert sont exclues de cette catégorie. Les chaudières sont quant à elles considérées à usage domestique jusqu'à une puissance de 70 kW.

La Figure 1.23 propose une vue des différents appareils indépendants de chauffage domestique au bois, qui selon leurs caractéristiques peuvent fonctionner avec une ou plusieurs formes de combustible, affichant alors une autonomie de fonctionnement plus ou moins importante en fonction de la taille du silo ou du réservoir de l'équipement, ainsi que diverses possibilités de contrôle et de régulation de la puissance émise.

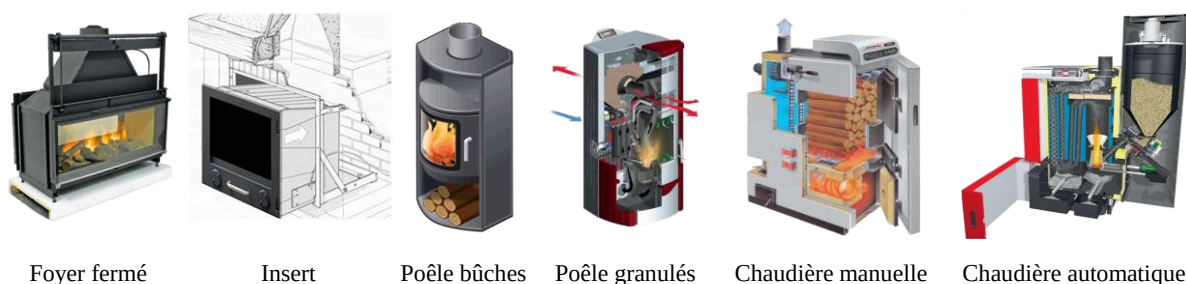


Figure 1.23 : Vues des différents appareils indépendants de chauffage au bois

On peut également noter le récent développement d'équipements de micro cogénération basé sur l'utilisation du bois énergie et produisant jusqu'à 10,5 kW de chaleur et 3 kW d'électricité, mais leur usage reste principalement tourné vers du petit collectif compte tenu des puissances affichées et du volume d'eau important (750 à 1000 litres) nécessaire au stockage de l'énergie produite.

Un récapitulatif des textes législatifs et techniques, ainsi que des règlements sanitaires relatifs à l'installation des appareils indépendants de chauffage domestique au bois et de leurs équipements associés (conduit d'évacuation des produits de combustion, dispositif d'entrée d'air comburant...) est proposé par [COSTIC_Bois, 2005] et permet d'apprécier les règles de l'art de ce secteur professionnel.

➤ Installation et raccordement

Toute installation de chauffage domestique au bois doit être mise en œuvre en respectant les règles de bonne pratique en vigueur. À ce titre, le choix et la conception du raccordement des appareils sont des éléments très importants qui permettent d'en garantir le fonctionnement optimal. En effet, le tirage thermique doit pouvoir être maintenu en toutes circonstances pour assurer la bonne évacuation des gaz de combustion et par ailleurs, leur refroidissement ne doit pas être trop important pour éviter la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées, qui peut causer la dégradation du conduit.

D'une manière générale, les appareils de chauffage domestique au bois et leur raccordement ne sont pas dangereux, mais des fuites peuvent se présenter en cas de mauvaise installation ou d'absence d'entretien. Ainsi, pour garantir à la fois la sécurité des utilisateurs, l'absence de défaillance de l'installation et accessoirement bénéficier du dispositif de crédit d'impôts, une attestation écrite garantissant la conformité de la réalisation doit être délivrée par l'installateur. Enfin, pour prévenir tout risque d'intoxication ou d'incendie, il est essentiel de programmer à intervalles réguliers des interventions de maintenance et de vérification de l'installation et de son raccordement.

- Appareils à cycle de combustion ouvert

C'est surtout l'utilisation d'appareils de chauffage au bois à cycle de combustion ouvert, i.e. qui puisent l'air de combustion nécessaire dans la pièce dans laquelle ils sont installés, qui doivent faire l'objet d'une attention particulière à l'installation. En effet, bien souvent, il n'existe aucune sécurité d'arrêt de fonctionnement dans les cas, assez rares, d'un défaut de raccordement, ou plus fréquents, d'une insuffisance de tirage thermique du conduit de cheminée (par exemple en cas d'absence de vent et de fonctionnement d'une hotte aspirante, d'un aspirateur centralisé...). Le risque de refoulement des produits de combustion dans la pièce est alors important.

Ainsi, il est obligatoire de prévoir et de garantir une amenée d'air extérieur qui soit dédiée et suffisante en partie basse de tout appareil de chauffage au bois à cycle de combustion ouvert, ou non étanche, pour y assurer une bonne combustion sans prélever d'air dans la pièce où il est installé. Cependant, seule la mise en place d'une alimentation indépendante en air de combustion associée à un appareil à cycle de combustion fermé constitue une solution pertinente pour éviter tout risque de refoulement des gaz de combustion dans l'habitation.

- Appareils à cycle de combustion fermé

Les appareils à cycle de combustion fermée, ou étanche, sont des dispositifs sûrs qui assurent à la fois l'apport d'air nécessaire pour une combustion correcte ainsi que l'évacuation des gaz de combustion, respectivement depuis et vers l'extérieur, via un circuit hermétiquement fermé. L'appareil doit donc posséder une chambre de combustion ne présentant fuite, même lorsque le corps de chauffe se dilate lors du fonctionnement et son raccordement doit être parfaitement étanche.

À l'image des pratiques couramment usitées pour effectuer le raccordement des chaudières gaz notamment, le raccordement des appareils de chauffage au bois à cycle de combustion fermé au moyen d'un conduit concentrique est une solution particulièrement adaptée et dont la mise en œuvre aisée favorise le développement. En effet, ce type de raccordement garantit un fonctionnement optimum de l'appareil sans risque de perturbation de la ventilation de l'habitation et aucune ouverture spécifique ne doit être aménagée pour apporter l'air de combustion.

➤ **Bilan énergie et environnement** [ADEME_Bois_ACV, 2005] [ADEME_Bois_Air, 2009]

En 2005, une étude prospective du bilan environnemental du chauffage domestique au bois, basée sur l'analyse du cycle de vie³⁸ (ACV), a été publiée par l'ADEME. Les trois grandes étapes identifiées lors de cette analyse sont l'extraction du combustible, son transport et sa distribution jusqu'au lieu de stockage, ainsi que son utilisation finale chez l'utilisateur. Le cycle de vie des appareils de chauffage est en revanche exclu des frontières de l'étude. L'unité fonctionnelle du bilan environnemental retenue pour cette étude est la production d'1 kWh de chaleur chez l'utilisateur.

Le Tableau 1.9 présente l'impact sur la consommation en énergie primaire non renouvelable et sur l'émission de gaz à effet de serre en équivalent CO₂ pour différentes solutions de chauffage domestique au bois, en comparaison d'autres solutions dites classiques.

Tableau 1.9 : Impact « énergétique » et « effet de serre » des solutions de chauffage domestique au bois

Solutions de chauffage domestique		Impact « énergétique »	Impact « effet de serre »
Combustible	Équipement	kWh _{EF utile} / kWh _{EP non EnR}	kg _{eq} CO ₂ / kWh _{EF utile}
Plaquettes bois	Chaudière (η = 75%)	20	0,033
Bûches bois	Chaudière (η = 70%)	14	0,033
Bûches bois	Poêle (η = 65%)	13	0,040
Granulés bois	Poêle (η = 85%)	6	0,042
Gaz	Chaudière (η = 95%)	0,8	0,222
Fioul	Chaudière (η = 95%)	0,7	0,466
Électricité	Convecteur (η = 100%)	0,3	0,180

Les résultats de l'étude montrent que, selon la solution considérée, le chauffage domestique au bois restitue entre 6 et 20 unités de chaleur pour une unité d'énergie non renouvelable consommée. En revanche, le critère d'impact « énergétique » des solutions classiques est toujours inférieur à l'unité, ce qui traduit le fait que leur consommation d'énergie primaire d'origine non renouvelable est supérieure par rapport à la quantité d'énergie qu'elles restituent sous forme de chaleur.

À la différence des solutions classiques, le chauffage domestique au bois restitue donc plus d'énergie qu'il ne consomme d'énergie primaire d'origine non renouvelable, celle-ci étant d'ailleurs presque intégralement liée à l'étape de mise à disposition du combustible aux consommateurs. À ce titre, la valeur dégradée du critère d'impact « énergétique » de la solution utilisant les granulés de bois provient en grande partie du conditionnement en sacs plastiques du combustible.

Concernant le critère d'impact « effet de serre », traduisant les émissions de GES en kg_{eq}CO₂ pour une unité de chaleur utilisée par le consommateur, les systèmes de chauffage au bois sont également très bien positionnés, avec environ 40 kg de CO₂ émis par MWh de chaleur utile produite alors que les chaufferies au gaz, au fioul et à l'électricité émettent respectivement 222 kg, 466 kg et 180 kg de CO₂ par MWh. Ainsi, l'utilisation du bois permet de diviser les émissions de CO₂ d'un facteur 4,5 par rapport à l'électricité, 5,5 par rapport au gaz et 11,5 environ par rapport au fioul.

³⁸ L'analyse du cycle de vie consiste à quantifier l'ensemble des impacts environnementaux d'un produit depuis l'extraction des matières premières utilisées jusqu'au traitement final des déchets.

En conclusion de l'étude, le bilan des consommations d'énergie primaire non renouvelable et celui des émissions de gaz à effet de serre est largement favorable pour les systèmes de chauffage domestique au bois. La principale voie d'amélioration de ces bilans concerne l'augmentation du rendement des appareils, ce qui permettrait de réduire les émissions de méthane et les rejets de composés organiques volatils. Pour les granulés de bois, un perfectionnement du processus de fabrication et un meilleur conditionnement du combustible basé sur l'utilisation de plastiques ou de papier-cartons recyclés sont également préconisés.

La combustion de bois libère toutefois des polluants dans l'atmosphère, qui proviennent à 95% du secteur domestique. Sur la base des données utilisées par le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) dans ses inventaires, il apparaît que le bois énergie contribue pour une très faible part, environ 2%, aux émissions nationales de dioxyde de soufre (SO_2) et d'oxydes d'azote (NO_x), et contribue à hauteur de 10% environ aux émissions de dioxines. En revanche, sa contribution est plus significative, en l'état actuel des technologies et des pratiques, vis-à-vis des émissions nationales de particules fines (PM_{10} , 27%) et très fines ($\text{PM}_{2.5}$, 40%), de celles des composés organiques volatils non méthanique (COVNM, 22%), du monoxyde de carbone (CO, 31%), et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, 77%).

Comme précisé précédemment, ces émissions sont essentiellement dues aux mauvaises conditions de la combustion du bois dans les habitations individuelles. À ce titre, les récentes mesures prises dans le secteur domestique, notamment par le plan particules du Grenelle Environnement, favorisent le renouvellement du parc d'appareils anciens par des équipements performants mis en œuvre par des professionnels qualifiés, l'entretien régulier des installations, ainsi que l'utilisation d'un combustible bois de qualité [Plan_Particules, 2010].

1.4.3. Mesures favorables de développement

➤ Possibilité d'installation dans toutes les maisons neuves [Arrêté_Conduit, 2005]

Depuis le 1^{er} septembre 2006, l'installation d'un chauffage domestique au bois est possible dans toutes les maisons neuves, car même s'il ne s'agit pas de la solution de chauffage initialement retenue, toutes les habitations chauffées à l'électricité doivent être pourvues d'un conduit d'évacuation de fumées lors de leur construction, conformément à l'arrêté du 31 octobre 2005 (cf. section 1.2.1, le paragraphe relatif au choix et remplacement de l'énergie des maisons individuelles).

➤ Reconnaissance par la réglementation thermique [Arrêté_TitreV, 2009]

Depuis l'arrêté du 9 juin 2009 (Titre V), les appareils de chauffage au bois indépendants de chauffage au bois ont intégré la méthode de calcul Th-C-E de la RT 2005 pour les constructions neuves. Cette technologie est donc reconnue comme un véritable moyen de chauffage et peut être prise en compte dans le calcul économique et énergétique lors de la construction, à condition que les performances des appareils répondent aux exigences du label Flamme Verte. Les types d'appareils visés sont les poêles à bois ainsi que les inserts et les foyers fermés dont les caractéristiques thermiques ne diffèrent pas des poêles. Deux modes de régulation des appareils y sont distingués et concernent d'un côté, les appareils indépendants de chauffage au bois bûches avec une régulation manuelle et de l'autre, les poêles à granulés de bois avec une régulation automatisée de la puissance. À noter, la surface habitable chauffée par le poêle ne doit pas dépasser 110 m² (hors salle de bain).

➤ **Qualification des installateurs et entretien des appareils** [Décret_Chaudières, 2009]

Sans obligation légale, mais pour la satisfaction et la sécurité de l'utilisateur, l'installation d'un appareil de chauffage domestique au bois doit être conçue et réalisée par un professionnel, qui est à même de proposer les bonnes caractéristiques du conduit d'évacuation des fumées, de vérifier la qualité du tirage de l'installation et d'en garantir le bon fonctionnement, conformément aux règles fixées par les documents techniques unifiés (DTU). À ce titre, depuis 2007, l'association *Qualit'EnR* délivre l'appellation *Qualibois*, dont le logo est présenté sur la Figure 1.24, aux installateurs d'appareils de chauffage domestique au bois qualifiés.



Figure 1.24 : Vue du logo Qualibois attribué aux professionnels qualifiés du secteur

Comme tous les appareils de chauffage, les inserts, foyers fermés et poêles à bois bûches et granulés nécessitent quelques opérations régulières d'entretien, telles que le décendrage du brasero, le nettoyage de la vitre, de la hotte et des grilles d'air chaud lorsqu'elles sont présentes, ainsi que la vérification périodique de l'appareil. À la différence de ces opérations légères d'entretien qui peuvent être réalisé par l'utilisateur, le décret du 9 juin 2009, impose l'intervention d'un professionnel qualifié pour l'entretien annuel des chaudières dont la puissance nominale est comprise en 4 et 400 kW.

Enfin, le ramonage mécanique et non pas seulement chimique des conduits de fumée en fonctionnement est obligatoire et doit être assorti d'un certificat délivré par un professionnel qualifié. Conformément au règlement sanitaire de chaque département, il en est généralement prévu deux par an, dont un en période de chauffe.

➤ **Exigences de performances des appareils** [Flamme_Verte, 2011]

Le parc d'appareils de chauffage domestique au bois en France est composé d'environ 6 millions de pièces, dont 60 à 70% d'appareils anciens peu performants et fortement émetteurs de polluants. Depuis 2000, la mise en place du label *Flamme Verte* favorise le renouvellement du parc d'appareils de chauffage domestique au bois en France, à raison de plus de 450 000 pièces par an, dont près de la moitié pour les seuls poêles à bûches et à granulés de bois, suivie de près par les inserts, les foyers fermés et les chaudières domestiques, les installations de cuisinières au bois étant marginales.

Créé à l'initiative de l'ADEME et des constructeurs français d'appareils de chauffage au bois, le label *Flamme Verte* permet d'identifier les équipements qui présentent à la fois des performances énergétiques élevées et une empreinte environnementale réduite. Depuis 2000, les appareils domestiques de chauffage au bois ont donc connu une amélioration sensible de leur rendement, avec des valeurs atteignant jusqu'à 85% pour des appareils à foyer fermé récents contre 50% environ pour les poêles et les inserts des années 1980. À présent, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sont considérablement réduites et la pollution par le soufre supprimée.

Dans la plupart des cas, les nouveaux appareils sont équipés d'une chambre de postcombustion, d'un contrôle de la quantité d'oxygène nécessaire et bien souvent, la phase de ralenti est supprimée pour empêcher la formation de goudrons. Enfin, le développement du combustible bois sous forme de granulés et de plaquettes permet de s'affranchir du chargement des bûches, d'offrir une grande autonomie de fonctionnement de l'appareil et d'apporter de nouvelles solutions de régulation. Ainsi, tous ces éléments qui contribuent à l'amélioration des équipements de chauffage domestique au bois permettent de favoriser l'essor de la filière et l'ouverture du marché vers de nouveaux utilisateurs du bois énergie.

Comme le montre la Figure 1.25, un nouvel étiquetage des équipements *Flamme Verte* est entré en vigueur en 2010 pour répondre à l'évolution des exigences de performances des appareils de chauffage domestique au bois, conformément aux décisions du Grenelle Environnement. Ainsi, les appareils de chauffage domestique au bois titulaires du label *Flamme Verte* sont désormais classés selon 5 catégories de performances, identifiées par un nombre croissant d'étoiles. Depuis le 1^{er} janvier 2010, les équipements doivent posséder au moins 3 étoiles pour être labellisés, puis 4 étoiles à partir du 1^{er} janvier 2012 et enfin 5 étoiles à partir du 1^{er} janvier 2015. Ces étoiles renseignent à la fois sur le rendement énergétique de l'appareil, sur la teneur des fumées en monoxyde de carbone et sur ses émissions de poussières. Les exigences en cours en 2011 sont présentées dans le Tableau 1.10.



Figure 1.25 : Vue du nouvel étiquetage étoilé du label Flamme Verte

En 2011, l'achat d'un appareil domestique de chauffage au bois labellisé donne droit à un crédit d'impôt de 22%. Ce taux est majoré à 36% si l'achat concerne le remplacement d'un équipement au bois ou à biomasse existant. Les cheminées ouvertes, considérées comme des équipements d'agrément et non pas comme des appareils de chauffage, sont exclues de ce dispositif.

Tableau 1.10 : Exigences de rendement et d'émissions de CO et de poussières des appareils Flamme Verte

Type d'appareil	Rendement*	Taux de CO*	Taux de poussières*	Norme
Cuisinière domestique	$\geq 70\%$	$\leq 0,3\%$	$\leq 125 \text{ mg/Nm}^3$	EN 12815
Chaudière domestique	$\geq 70\%$	$\leq 0,3\%$	$\leq 125 \text{ mg/Nm}^3$	EN 12809
Foyer fermé et insert	$\geq 70\%$	$\leq 0,3\%$	$\leq 125 \text{ mg/Nm}^3$	EN 13229
Poêle à bûches	$\geq 70\%$	$\leq 0,3\%$	$\leq 125 \text{ mg/Nm}^3$	EN 13240
Poêle à accumulation	$\geq 75\%$	$\leq 0,3\%$	$\leq 125 \text{ mg/Nm}^3$	EN 15250
Poêle à granulés	$\geq 85\%$	$\leq 0,04\%$	$\leq 50 \text{ mg/Nm}^3$	EN 14785

* les seuils à respecter s'entendent à 13% d'O₂

➤ **Actions de recherche et de développement** [ADEME_Bois_R&D, 2009]

Pour améliorer les performances énergétiques et environnementales des appareils de chauffage domestique au bois, ainsi que leurs conditions d'intégration dans l'habitat, l'ADEME a conduit un programme de recherche et de développement sur le thème « chauffage domestique au bois énergie » associant les professionnels de la filière bois, les fabricants de matériels et les laboratoires de recherche universitaires les plus en pointe sur ce sujet.

Le Tableau 1.11 dresse l'inventaire des 11 projets qui ont été accompagnés entre 2005 et 2008, totalisant un investissement global de 4 M€ dont près de la moitié a été apportée par l'ADEME. Les principaux objectifs visaient à réduire significativement les émissions de polluants des appareils mis sur le marché et de faciliter l'intégration du bois énergie dans l'habitat.

Tableau 1.11 : Inventaire des projets ADEME « chauffage domestique au bois énergie » entre 2005 et 2008

Année	Titre et partenaires du projet
2008	Évaluation de solutions de réduction des émissions polluantes (gazeuses et particulaires) d'appareils de chauffage résidentiels alimentés à la biomasse. CSTB, LGRE, TEN, D2I/INVICTA, FONDIS, LORFLAM, PYROLITHE Évaluation technico-économique des performances énergétiques et environnementales des meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de poussières fines et des composés organiques pour les appareils de combustion domestiques utilisant la biomasse (Peren2bois). INERIS, CHAZELLES, AXIS-INTEGRAL FIRE, ENERGIE 79, SUPRA, POUJOULAT, APP SA, EIFER, CITEPA, CTIF, LERMAB, LMSPC, LCME
2007	Études et conception d'un échangeur air/air haute performance pour son intégration dans un micro-générateur à bois fluidisé disposant d'un moteur à combustion externe haut rendement AMOES SAS, LERMAB, ENERGIE 79 S.A.S., T.E.T. S.A.S., STEF TREMBLIN frères Estimation de l'impact environnemental du chauffage domestique au bois à l'échelle locale LERMAB, TECHNOVA, LGRE, DE DIETRICH THERMIQUE, EIFER
2006	Optimisation d'une solution couplée bois-solaire pour maisons individuelles (OptiBioSol). CEA, Chaudières ZAEGEL HELD, Chaudières CHAROT Chaudières domestiques à bûches ou à granulés de bois à condensation - Faisabilité et développement CETIAT, Chaudières DE DIETRICH Thermique, Société Industrielle de Chaudières, CERIC-POUJOULAT Influence du système d'évacuation des fumées sur le rendement d'un chauffage domestique au bois LNE, CERIC-Cheminées POUJOULAT, TECHNOVA
2005	Développement de foyers fermés "grande vision" à hautes performances environnementales BRISACH, TOTEM FIRE, CETIAT Mise au point d'un procédé de traitement catalytique des émissions issues d'un appareil de chauffage domestique au bois LRGE (UHA), FONDIS Évaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique au bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur INERIS, LCME (Chambéry), CITEPA, CSTB (OQAI) Les émissions polluantes liées au chauffage au bois, que ce soit vers l'extérieur par les fumées ou en intérieur en émissions diffuses dans l'habitat LERMAB (ENSTIB), LGRE, SUPRA

Les différents projets portés par les 33 organismes publics et privés impliqués dans ce programme ont été sélectionnés de manière à répondre à deux objectifs majeurs :

- Développer la performance énergétique et environnementale des appareils et combustibles ;
- Développer le confort d'utilisation et d'entretien des systèmes de chauffage à la biomasse, ainsi que leur intégration dans le logement.

Les principales voies d'innovation portent sur l'amélioration de la qualité de l'air chauffé, le développement des dispositifs de filtration et de catalyse pour un chauffage à émission nulle en CO, la diminution des consommations en électricité et en combustible, la réduction des puissances délivrées par les équipements et leur meilleure intégration dans les logements, notamment par la mise en place d'une entrée d'air de combustion indépendante pour éviter tout déséquilibre de la ventilation, ainsi que le développement de systèmes de chauffage au bois en combinaison avec d'autres énergies.

À titre d'exemples, le dispositif « Zéro CO » développé par la société FONDIS et l'Université de Haute-Alsace est un catalyseur qui a été élaboré, testé et optimisé dans le cadre de ce programme avant d'être commercialisé. Son usage en fonctionnement permet de diminuer fortement les émissions de monoxyde de carbone (-60%) et d'hydrocarbures (-20%) en sortie de foyer. Les connaissances sur la formation et l'émission des polluants atmosphériques engendrés par la combustion du bois ont également été enrichies grâce à des campagnes expérimentales. Il a aussi été montré que des solutions nouvelles d'alimentation en air comburant des appareils de type poêles, basées sur l'utilisation de conduits de cheminée concentriques, permettent une augmentation de 5 à 10% du rendement de la combustion. Enfin, des travaux ont permis le développement et l'optimisation d'un chauffage central au bois énergie, couplé à un système de production d'ECS solaire thermique et des émetteurs à basse température, baptisé OptiBioSol (cf. Figure 1.26) et commercialisé par CHAROT depuis 2010.

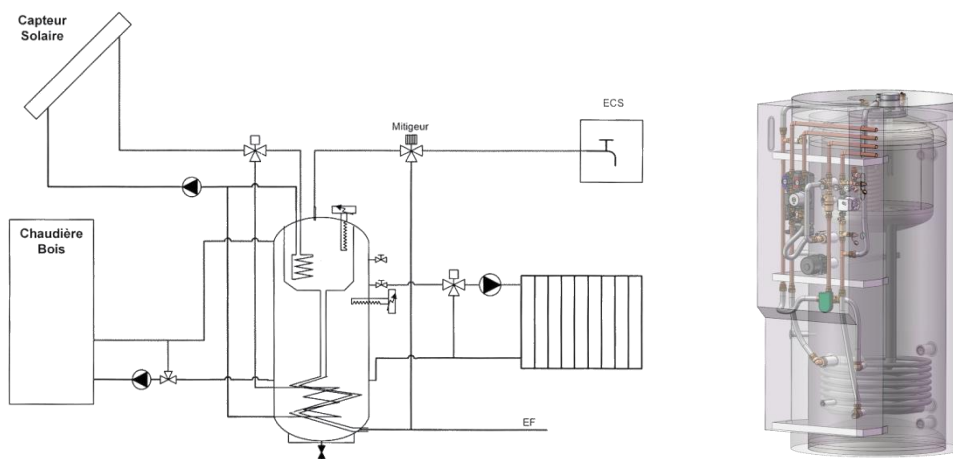


Figure 1.26 : Schéma de principe et vue de la solution combinée Chauffage-ECS-Bois-Solaire OptiBioSol

Depuis 2009, l'activité de recherche et développement coordonnée par l'ADEME et relative au chauffage domestique, collectif et industriel, s'inscrit dans le cadre du programme « Bioressources Industries Performance (BIP) », avec une priorité affichée de préservation de la qualité de l'air.

De nombreuses réflexions et retours d'expériences sur le devenir des appareils domestiques au bois, parmi l'éventail des solutions traditionnelles et émergentes de chauffage, de climatisation et de production d'ECS dans les bâtiments neufs et réhabilités, viennent également alimenter les travaux menés dans le cadre du PREBAT [PUCA, 2009].

1.5. VECTEUR AIR

Il est indispensable de ventiler suffisamment les logements pour assurer une bonne qualité de l'air intérieur. De plus, dans les consommations d'énergie d'un bâtiment, la part liée à la ventilation représente entre le tiers et la moitié de la facture selon le niveau d'isolation et plus encore s'il s'agit d'une construction dite passive. Le choix d'un système de ventilation permettant de maîtriser au mieux les débits de renouvellement d'air au sein d'un bâtiment constitue donc un facteur déterminant dans la maîtrise des consommations d'énergie. À ce titre, les systèmes à récupération de chaleur sur l'air extrait et à haute efficacité sont amenés à connaître un développement important dans les bâtiments de type BBC, d'autant qu'ils peuvent même devenir le principal chauffage de ces habitations dont l'enveloppe présente à la fois un excellent niveau d'isolation thermique et une forte étanchéité à l'air.

1.5.1. Rôle et importance de la ventilation

De manière générale, le rôle de la ventilation dans un bâtiment consiste à apporter un air neuf et sain dans les zones occupées et à extraire des zones d'activités et de services la partie de l'air qui est dite viciée, c'est-à-dire chargée d'humidité, de polluants, de poussières ou encore de mauvaises odeurs. Le but est de maintenir un climat intérieur assurant la santé et le bien être des occupants, avec une température, une humidité relative et une circulation de l'air adéquates, conformément aux normes relatives à l'ergonomie des ambiances thermiques [NF_EN_7730, 2006] [NF_EN_15251, 2007]. De plus, la ventilation permet de préserver la conservation du bâti, essentiellement grâce à l'évacuation de l'air saturé en humidité, en évitant ainsi d'une part les phénomènes de condensation, dont les plus dommageables se produisent à l'intérieur des parois, et d'autre part le développement de moisissures.

➤ Qualité de l'air

La qualité de l'air dans les bâtiments est souvent moins bonne que celle à l'extérieur. Ce constat provient principalement du fait que les occupants et leurs diverses activités sont des sources d'émission de vapeur d'eau, de CO₂ et d'autres polluants, au même titre que le bâtiment, du fait de certains matériaux, revêtements, mobiliers et plantes qu'il contient. Enfin, les espaces clos favorisent l'accumulation des polluants. La qualité de l'air intérieur (QAI) dépend ainsi de trois groupes de paramètres qui concernent tout d'abord la nature et le nombre de sources de polluants internes, puis la valeur et la modularité du taux de renouvellement de l'air extrait par de l'air neuf grâce au système de ventilation, et enfin la qualité de l'air extérieur.

Dans un local, la QAI est considérée comme acceptable si l'air ne contient aucun polluant connu à des concentrations dangereuses pour la santé des occupants et si la majorité d'entre eux n'exprime pas d'insatisfaction ni de malaise durant la période d'occupation. La principale réponse à la conservation d'une bonne QAI reste la réduction « à la source » de la pollution, mais l'usage des bâtiments y implique nécessairement des activités émettrices, dont seul un système de ventilation ou de dépollution adapté peut réussir à en diminuer ou à en éliminer la charge. Les pathologies liées aux bâtiments (Building Related Illness) sont assez rares mais peuvent avoir de graves conséquences pour les occupants, comme dans les cas relatifs à la légionellose. Le concept de syndrome des bâtiments malsains (Sick Building Syndrome), introduit par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 1982, est d'origine multifactorielle et s'accompagne de nombreux types de symptômes liés en général aux émissions des matériaux constructifs et décoratifs du bâtiment, ainsi qu'à une exposition prolongée des occupants aux polluants dans des zones pour lesquelles le renouvellement de l'air n'est pas adapté à l'activité qui y règne [Roulet, 2008].

➤ Principales fonctions

Un système de ventilation doit permettre de répondre à différentes fonctions prioritaires, tout en respectant d'autres fonctions, dites contraintes, telles qu'établies et présentées dans le Tableau 1.12.

Tableau 1.12 : Identification des principales fonctions de la ventilation

Fonctions prioritaires	Fonctions contraintes
• Préserver l'occupant des sources internes et externes de pollution. • Préserver le bâti des dégradations liées à l'humidité contenue dans l'air intérieur. • Satisfaire les besoins de renouvellement d'air en fonction de l'activité régnant dans les différentes zones du bâtiment. • Satisfaire les besoins de l'occupant en matière de maîtrise de l'aération, par une bonne qualité d'usage et de gestion du confort. • Limiter les déperditions de chaleur par renouvellement d'air grâce à la maîtrise des débits d'air extraits.	• Conserver l'intégrité du bâti et la sécurité des occupants, par la maîtrise des risques de condensation, de propagation d'incendie... • Conserver le bon fonctionnement des équipements et des appareils à combustion. • Conserver un environnement extérieur de qualité, par la maîtrise des rejets d'air vicié et du bruit généré par les installations. • Préserver le confort des occupants au niveau thermique, acoustique et visuel. • S'adapter au comportement des occupants. • Limiter les coûts d'installation, de fonctionnement et de maintenance. • Présenter des facilités d'intégration.

De manière générale, la ventilation doit donc répondre à trois exigences principales qui visent dans l'ordre la préservation de la santé des occupants, la bonne tenue des ouvrages bâtis et la réalisation d'économies d'énergie de chauffage grâce à la maîtrise du renouvellement d'air. Si les deux premières exigences impliquent une certaine élévation des débits insufflés, en revanche la troisième tend à s'y opposer. L'établissement d'une bonne ventilation résulte alors d'un compromis qui ne doit pas être uniquement basé sur la maîtrise de la consommation d'énergie [Awbi, 2003].

➤ Textes réglementaires

Dans le cas des logements groupés, l'article 31 du règlement sanitaire départemental type fixe les dispositions relatives à l'installation des appareils à combustion, des conduits de fumées, ainsi que des conduits de ventilation. Il précise qu'il est interdit de faire circuler l'air d'un logement dans un autre logement et de rejeter l'air vicié en provenance des pièces de service dans les parties communes de l'immeuble d'habitation.

En France, la réglementation relative à l'aération des logements dans l'habitat collectif et individuel est définie par l'arrêté du 24 mars 1982, modifié par l'arrêté du 28 octobre 1983. Elle impose une circulation de l'air depuis chacune des pièces principales jusqu'aux pièces de service, dite à balayage, ainsi qu'une aération générale et permanente dans les conditions climatiques moyennes d'hiver. Des valeurs minimales de débits d'extraction sont fixées dans les pièces de service. Elles sont données en fonction du nombre de pièces principales du logement et des possibilités de régulation du système de ventilation utilisé [Arrêté_Vent, 1982]. Dans le cas d'un système mécanique ou naturel, dépourvu de tout dispositif de réglage ou de modulation, les valeurs minimales des débits extraits à atteindre dans chaque pièce de service du logement sont données dans le Tableau 1.13.

Tableau 1.13 : Valeurs des débits extraits dans chaque pièce de service, à atteindre simultanément ou non

Nombres 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 +	135	30	15	30	15

Certains dispositifs individuels de réglage permettent ensuite de réduire les débits à condition que le débit total extrait et le débit réduit extrait en cuisine soient au moins égaux aux valeurs données en fonction du nombre de pièces principales du logement par le Tableau 1.14. Enfin, lorsqu'un dispositif mécanique module automatiquement le renouvellement d'air du logement en fonction de l'humidité, des taux de pollution de l'air intérieur ou de l'occupation des locaux, il est possible de réduire de façon drastique les valeurs du débit total extrait, comme indiqué dans le Tableau 1.15.

Tableau 1.14 : Valeurs minimales du débit extrait total et en cuisine avec dispositifs individuels de réglage

Nombre de pièces principales	1	2	3	4	5	6	7 et +
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

Tableau 1.15 : Valeurs minimales du débit extrait total avec dispositifs à modulation automatique

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

Instituée par l'arrêté du 28 octobre 1994 et modifiée par les deux arrêtés du 30 juin 1999, la nouvelle réglementation acoustique (NRA) définit notamment les niveaux de qualité d'isolation aux bruits dans toutes les nouvelles constructions de logements depuis le 1^{er} janvier 1996. Des exigences d'isolation acoustique adéquates sont ainsi imposées en fonction du type de nuisance, comme le bruit véhiculé par l'air extérieur, propagé par l'air intérieur ou encore émis par des appareils d'équipement [Arrêté_NRA, 1994]. Concernant les niveaux sonores émis par les appareils d'équipement, les valeurs à ne pas dépasser dans les pièces principales et en cuisine sont données dans le Tableau 1.16.

Tableau 1.16 : Valeurs maximales acceptées des niveaux sonores émis par les appareils d'équipement

Niveau de pression acoustique normalisé en dB(A)		Appareil individuel de chauffage ou de climatisation	Appareil d'équipement individuel	Installation de ventilation mécanique (en débit minimal)
Local de réception	Pièce principale	35 (40 si cuisine ouverte)	30	30
	Cuisine	50	35	35

La réglementation thermique impose des objectifs d'économie d'énergie par la limitation des déperditions par renouvellement d'air des locaux, qui concernent aussi bien les pertes imposées par le système de ventilation, que les pertes non maîtrisées par les fuites d'air de l'enveloppe. L'impact énergétique de la consommation des auxiliaires utilisés pour le fonctionnement du système de ventilation est également totalisé [RT-bâtiment, 2012]. Il convient ainsi, lors de la conception et du dimensionnement d'une installation de ventilation, d'opter pour des ventilateurs peu consommateurs en énergie, de limiter les pertes de charge dans les réseaux de distribution et/ou d'évacuation et d'adapter les débits d'air extraits et insufflés en fonction de l'occupation et de l'activité réelle des locaux. Dans les cas où il y a contradiction entre la limitation des consommations énergétiques et les besoins d'ordre hygiénique, ce sont ces derniers qui doivent prioritairement pouvoir être respectés.

Au niveau des mesures de sécurité contre les risques d'incendie, les habitations individuelles sont uniquement concernées par la mise en place d'un détecteur avertisseur autonome de fumée avant le 8 mars 2015 [Décret_DAAF, 2011] (cf. section 1.2.2). Pour les bâtiments collectifs d'habitation, les installations de ventilation doivent être réalisées conformément aux exigences de l'arrêté du 31 janvier 1986, modifié par les arrêtés du 18 août 1986 et du 19 septembre 1988, de manière à limiter la transmission des fumées et gaz de combustion d'un local en feu à un autre local et d'en éviter le refoulement par les bouches d'extraction [Arrêté_Incendie, 1986]. Il est également précisé que tout conduit collectif de ventilation mécanique ou naturelle doit être réalisé en matériaux incombustibles.

D'un point de vue de la sécurité de fonctionnement des appareils de combustion présents dans l'habitation, l'arrêté de 1982 modifié par celui de 1983, stipule que le système d'aération du logement doit pouvoir assurer les débits nécessaires au bon fonctionnement de ce type d'appareil dans le cas où il présente un cycle de combustion ouvert, et ne doit pas s'opposer à la bonne évacuation des fumées et des gaz de combustion dans le cas d'un conduit fonctionnant par tirage naturel [Arrêté_Vent, 1982]. L'installation naturelle ou mécanique de ventilation doit alors être telle que la dépression créée dans le logement par l'évacuation de l'air vicié ne puisse pas entraîner d'inversion de tirage, notamment lors de l'allumage de certains foyers.

Les règles de conception d'une installation de ventilation, dites aussi règles de l'art, doivent ainsi permettre d'assurer les débits prévus par la réglementation, tout en tenant compte des contraintes d'ordre acoustique, énergétique et de sécurité mentionnées précédemment. À ce titre, les différentes professions ont établis des recommandations qu'il convient de respecter et qui se présentent sous la forme de documents techniques unifiés (DTU), de normes ou d'avis techniques (ATec) pour les matériels d'équipement. La ventilation dans les bâtiments fait l'objet des DTU 68.1 et 68.2, qui pour le premier a été publié sous forme de norme expérimentale en juillet 1995 et pour le second est homologué en tant que norme depuis le 5 avril 1993. Le DTU 68.1 concerne les installations nouvelles de ventilation dans les bâtiments à usage d'habitation, tant en construction neuve qu'en réhabilitation. Il définit les critères de conception et de dimensionnement de ces installations, à l'aide d'une méthode de calcul du réseau aéraulique qui permet de se conformer aux exigences réglementaires de ventilation dans les logements [DTU_68.1, 1995]. Le DTU 68.2 définit quant à lui, les conditions d'exécution des installations d'extraction mécanique d'air vicié, notamment pour limiter les pertes de charge et assurer le bon équilibre des réseaux [DTU_68.2, 1993].

Ces règles de conception et d'exécution traitent des questions relatives à la bonne sélection et implantation des différents éléments de l'installation de ventilation, tels que les entrées et sorties d'air, les passages de transit, les ventilateurs, les conduites, les filtres, les pièges à sons, les récupérateurs de chaleur, les capteurs, les actionneurs et autres organes de réglage et de contrôle.

➤ Principes de ventilation

Pour assurer le renouvellement de l'air à l'intérieur des bâtiments, la ventilation peut s'effectuer suivant l'un des principes suivants [Koffi, 2009].

- Ventilation par balayage

Comme représenté sur la Figure 1.27, le principe de la ventilation par balayage consiste en une circulation d'air permanente au sein du logement au moyen d'un système naturel ou mécanique, qui permet à la fois l'introduction d'air neuf dans les pièces principales (séjour et chambres) et l'extraction d'air vicié au niveau des pièces de service (cuisine, salles de bain et toilettes). Le transfert de l'air s'effectue ainsi des zones les moins polluées vers les zones les plus polluées, grâce au détalonnage des portes intérieures ou au moyen de grilles de transit.

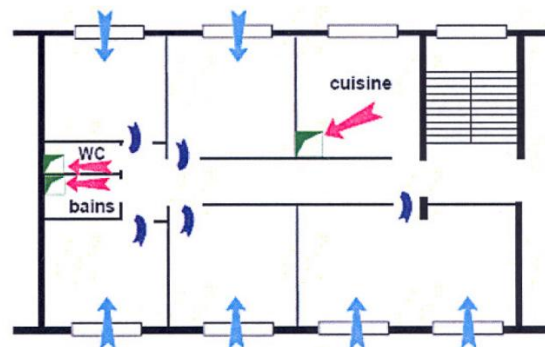


Figure 1.27 : Principe de la ventilation par balayage dans l'habitat

- Ventilation par pièces séparées

La Figure 1.28 décrit le principe de la ventilation par pièces séparées, dans lequel l'entrée et l'évacuation de l'air s'effectue dans la même pièce, soit par une même voie d'entrée et de sortie, comme c'est le cas avec une fenêtre ouverte, soit par deux orifices situés en façade, l'entrée étant alors en partie basse et la sortie en partie haute, ou encore par une entrée d'air située en façade et une voie d'extraction mécanique ou un conduit à tirage naturel, ou enfin par un système mécanique assurant dans la même pièce l'amenée d'air neuf et l'extraction d'air pollué.

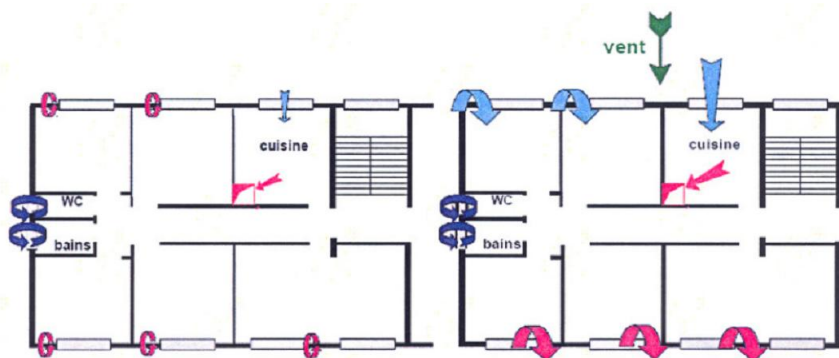


Figure 1.28 : Principe de la ventilation par pièces séparées dans l'habitat

Sur la représentation donnée par la Figure 1.28, la cuisine possède une entrée d'air neuf en partie basse de la façade et un conduit d'extraction. La salle de bains et les cabinets ne sont munis que d'ouvrants pour leur aération. Les pièces principales sont équipées d'ouvrants perméables à l'air, c'est-à-dire que l'air y pénètre lors de l'ouverture des fenêtres et à travers les défauts d'étanchéité des ouvrants sous les effets du vent et du tirage thermique dans une moindre mesure.

Dans le cas d'une ventilation par pièces séparées, le renouvellement de l'air à l'intérieur du logement est donc essentiellement assuré au travers des fenêtres et des défauts d'étanchéité de l'enveloppe. En présence de vent, le logement est alors balayé par un vent traversant, mais la circulation de l'air dans le logement n'est pas maîtrisée en permanence et des transferts inverses peuvent avoir lieu des pièces techniques vers les pièces principales.

- Ventilation par balayage partiel

La ventilation par balayage partiel est un principe hybride entre la ventilation par balayage et la ventilation par pièces séparées. Les entrées et les sorties d'air sont situées dans des pièces différentes, mais le cheminement de l'air dans le logement n'est pas réellement maîtrisé.

La Figure 1.29 présente ainsi le cas d'un logement dans lequel des entrées d'air neuf existent dans les pièces principales, ainsi qu'un système d'extraction de l'air vicié en cuisine, mais dans lequel la salle de bain et les cabinets sont uniquement ventilés par des ouvrants, c'est-à-dire séparément.

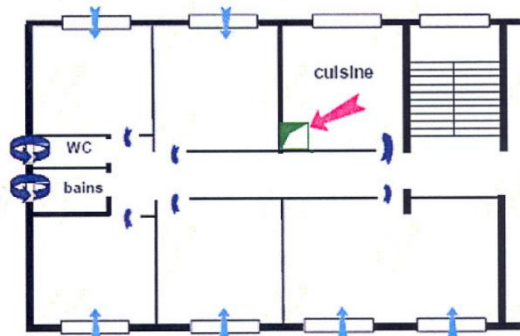


Figure 1.29 : Principe de la ventilation par balayage partiel dans l'habitat

Depuis 1982, la réglementation liée à l'aération des logements impose la mise en place d'une ventilation par balayage [Arrêté_Vent, 1982]. Les cas de ventilation par pièces séparées et par balayage partiel se retrouvent donc essentiellement dans les logements anciens pour lesquels l'utilisation de l'air comme unique vecteur de chauffage n'est pas envisageable sans mener au préalable d'importants travaux au niveau de l'isolation et de l'étanchéité de l'enveloppe. Ces travaux doivent alors nécessairement être associés à la mise en place d'une ventilation performante pour éviter la dégradation de la QAI et les risques de dommages au niveau du cadre bâti.

De même, au sein d'un bâtiment particulièrement isolé et étanche, un renouvellement d'air mal maîtrisé peut, s'il est trop faible, entraîner des risques importants pour la santé des occupants, ou s'il est trop élevé, dégrader de façon conséquente les performances du bâti. Il convient alors d'adopter une ventilation performante parmi les différents systèmes présentés ci-après.

➤ **Systèmes de ventilation** [Concannon, 2002]

De manière générale, la ventilation peut être naturelle, mécanique ou hybride. En outre, tout système de ventilation peut être asservi pour un meilleur contrôle des ambiances intérieures et des débits d'aération. Il est ensuite courant de distinguer quatre grandes catégories de systèmes de ventilation selon les types d'admission d'air neuf et d'évacuation d'air vicié utilisés dans le logement, comme représenté sur la Figure 1.30.

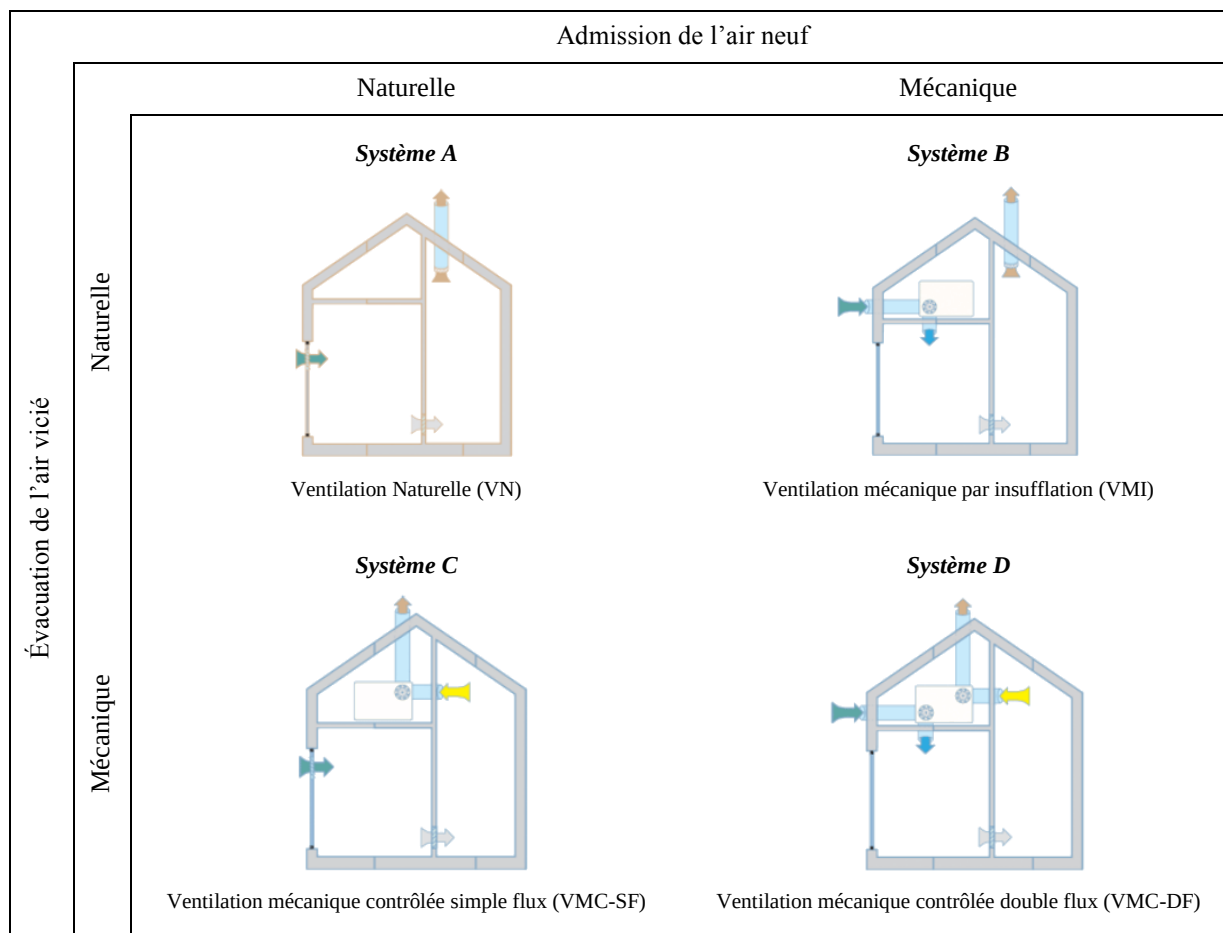


Figure 1.30 : Principe des quatre systèmes de ventilation selon le type d'admission et d'évacuation d'air

- **Système A : ventilation naturelle (VN)**

La ventilation naturelle est un système de ventilation permettant de renouveler l'air intérieur des bâtiments en utilisant uniquement les écarts de pression dus au vent et à l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur, aussi appelé tirage thermique. Ces deux moteurs de circulation sont variables dans le temps, agissent de manière complémentaire ou en opposition et dépendent fortement du site, ce qui rend très difficile tout contrôle des débits d'air de ventilation [Russell, 2005].

On distingue la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres et la ventilation naturelle par conduits verticaux. L'ouverture des fenêtres permet de réduire les infiltrations d'air par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe et donne aux occupants la possibilité de contrôler le niveau d'aération du bâtiment, mais aussi simple et peu coûteuse soit-elle, c'est une méthode qui présente des inconvénients quant à la maîtrise des débits d'air et qui augmente donc sensiblement les déperditions énergétiques.

Les conduits verticaux permettent de favoriser l'évacuation par effet de tirage thermique, même en cas de vent faible, mais lorsque la dépression en toiture est inférieure à celle de la façade sous le vent, il peut exister un risque de refoulement de l'air vicié ou des produits de combustion dans les logements. Ce dysfonctionnement est le plus souvent évité par l'installation d'extracteurs statiques ou mécaniques aux débouchés des conduits pour maintenir en permanence une dépression suffisante en toiture. On parle alors de ventilation naturelle assistée mécaniquement, ou hybride.

- Système B : ventilation mécanique par insufflation (VMI)

Ce système mécanique fonctionne à simple flux, puisque seule l'insufflation d'air neuf dans les pièces principales est contrôlée mécaniquement et que l'évacuation s'effectue de manière naturelle au moyen de conduits verticaux ou d'ouvertures en partie haute dans les pièces de service. Ce système permet de filtrer et de réchauffer l'air neuf soufflé dans le bâtiment, qui se trouve alors en surpression par rapport à l'extérieur, ce qui limite toute entrée d'air parasite mais peut augmenter les transferts d'humidité à travers les parois, d'autant que l'extraction de l'humidité et des polluants peut être assez éloignée des sources d'émission.

- Système C : ventilation mécanique contrôlée simple flux (VMC-SF)

La ventilation mécanique par extraction simple est plus connue sous l'appellation courante de ventilation mécanique contrôlée simple flux, même si cette appellation peut paraître ambiguë car le mot extraction n'y figure pas. Ce type de systèmes à extraction simple utilise donc uniquement un dispositif d'évacuation mécanique de l'air vicié dans les pièces de service au moyen d'un ventilateur généralement central. Les polluants sont ainsi extraits au plus près des sources d'émission. Des ouvertures calibrées permettent l'admission de l'air neuf dans les pièces principales, le plus souvent au niveau des fenêtres ou des coffres de volets roulants, mais la filtration est difficilement réalisable. Avec ce type de système, le bâtiment est placé en légère dépression par rapport à l'extérieur, ce qui favorise les entrées d'air parasites par les défauts d'enveloppe et le risque d'introduction de polluants extérieurs, tels que le radon. En outre, la température de l'air entrant ne peut pas être contrôlée, provoquant des courants d'air frais causant l'inconfort thermique des occupants en hiver.

- Système D : ventilation mécanique contrôlée double flux (VMC-DF)

La ventilation mécanique contrôlée double flux est la combinaison des systèmes d'insufflation et d'extraction mécanique. Le système est composé de deux ventilateurs indépendants avec deux réseaux de conduits séparés, l'un pour insuffler de l'air neuf dans les pièces principales et l'autre pour extraire l'air vicié dans les pièces de service. En conséquence, ce type de système présente des coûts d'investissement et de fonctionnement plus élevés que les systèmes à simple flux, mais il permet une meilleure maîtrise du débit d'air neuf insufflé dans les pièces principales, qui en outre peut être préchauffé par l'air extrait au niveau d'un échangeur de chaleur. Ce type de système est donc très répandu dans les pays froids et la possibilité de récupération de chaleur sur l'air extrait via un échangeur à haute efficacité en fait un système particulièrement adapté aux exigences des bâtiments de type BBC. L'équilibre des débits extraits et insufflés, ainsi que la bonne étanchéité de l'enveloppe sont alors des critères majeurs pour garantir l'efficacité du système.

Il existe depuis peu des systèmes à double flux par pièce qui se composent d'un ventilateur double flux individuel doté d'un échangeur de chaleur et monté en façade de chaque pièce principale. Un système identique ou un système d'extraction simple peut être installé dans les pièces de service.

De manière générale, la VMC simple flux par extraction constitue le système de base de la réglementation en matière de ventilation des logements en France [Ribéron, 1996], même si le marché s'ouvre peu à peu aux autres systèmes de ventilation mécanique [Ribéron, 2009]. En effet, seuls les systèmes mécaniques permettent d'assurer une indépendance et une maîtrise des débits d'air de ventilation par rapport aux conditions extérieures, limitant ainsi les consommations. En revanche, ils nécessitent tous un dimensionnement et une mise en œuvre adéquats, ainsi qu'une maintenance régulière, en particulier pour la VMC-DF, qui est toutefois l'unique système permettant de s'affranchir de toute nuisance sonore provenant de l'extérieur.

➤ **Stratégies de contrôle**

En fonction de la nature des bouches d'entrée et de sortie d'air des systèmes de ventilation mécaniques, on distingue un mode de fonctionnement constant, dit aussi autoréglable, et un mode permettant de moduler les débits d'air extrait en fonction de l'humidité relative. Ce dernier est qualifié d'hygroréglable et possède des bouches d'entrée et/ou d'extraction d'air qui se dilatent à mesure que l'air vicié est chargé d'humidité. Deux types de ventilation hygroréglable peuvent être rencontrés [CSTB_Cahier, 2008]. Le type Hygro A possède des entrées d'air fixes ou autoréglables, tandis que le type Hygro B présente des entrées d'air hygroréglables qui permettent de moduler le débit d'air neuf entrant dans les différentes pièces principales en fonction de leur humidité relative. Les systèmes hygroréglables permettent ainsi de réduire de manière significative les consommations énergétiques excessives liées à un changement d'air trop important, tout en évitant les risques de condensation dans les logements. À ce titre, des travaux [Afshari, 2005] montrent que la régulation des débits d'air par l'humidité relative permet de réduire les dépenses énergétiques de 20 % à 30 % par rapport à la ventilation mécanique par extraction permanente, tout en maintenant une bonne qualité de l'air.

Les principaux paramètres et types de stratégie de contrôle de la ventilation dans les bâtiments résidentiels ont été étudiés dans le cadre de l'Annexe 18 « Demand Controlled Ventilation » de l'AIE. Les différentes variables de commande, ou paramètres contrôlés, peuvent être [Mansson, 1992] :

- la concentration en CO₂ de l'air intérieur dans les pièces principales ;
- l'humidité relative Hr% de l'air intérieur dans les pièces de service ;
- la concentration en COV de l'air intérieur dans le séjour et/ou les toilettes ;
- la température de l'air intérieur dans les différentes pièces ;
- la présence des occupants par détection de leurs mouvements.

Les différentes grandeurs de réglage concernent alors essentiellement la vitesse du ou des ventilateur(s), ainsi que les sections d'ouverture des bouches d'admission et d'extraction d'air. Le déclenchement de la modulation peut alors s'effectuer de façon manuelle, ou suite à l'utilisation de l'éclairage artificiel comme dans le cas des pièces de service, ou encore grâce à des capteurs de polluants ou des détecteurs de présence, ou enfin par des dispositifs d'horloge. L'un des points essentiels mis en évidence par l'étude est que le taux de CO₂ constitue un excellent indicateur de la présence d'occupants, d'activités et du débit de ventilation requis dans les bâtiments résidentiels.

En synthèse, la ventilation des logements possède un rôle majeur pour la préservation de la QAI, de la structure bâtie et du confort des occupants. Elle présente une large variété d'installations et de nombreuses possibilités de modulation, mais elle est aussi soumise à des contraintes réglementaires parfois incompatibles avec la réduction des consommations énergétiques.

1.5.2. Description et condition d'application du chauffage à air

➤ Historique

Le chauffage à air est apparu dans les années 1950. Il fut tout d'abord destiné à chauffer de grands bâtiments avec une hauteur sous plafond importante. Dans les années 1970, son développement dans les bâtiments d'habitation a été marqué par de nombreux problèmes d'inconfort et son utilisation est encore mal perçue aujourd'hui. La Figure 1.31 est issue du catalogue d'un constructeur de plancher chauffant [Roth, 2010] et illustre très bien ce propos, car elle présente le chauffage à air pulsé comme le plus éloigné du chauffage idéal.

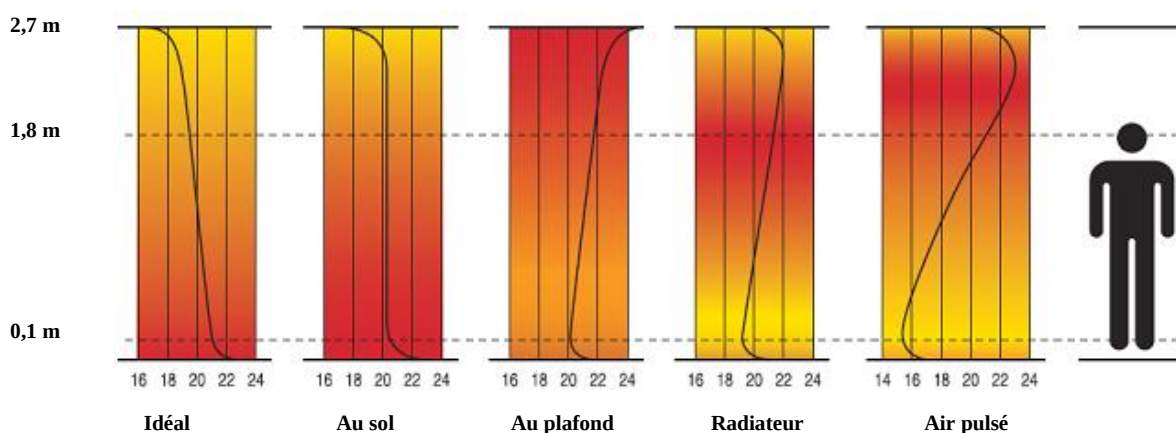


Figure 1.31 : Champ de température créé par différents émetteurs de chaleur

En effet, avec une capacité calorifique massique 4 fois inférieure à celle de l'eau et une masse volumique 1000 fois plus faible, l'air n'est pas un fluide caloporteur approprié pour chauffer un bâtiment peu ou pas isolé. Les situations d'inconfort rencontrées dans ce type de bâtiment sont alors tout à fait compréhensibles, car soit la puissance de chauffage véhiculée par l'air est insuffisante pour couvrir les déperditions, soit les installations répondent à ces besoins par une excessive augmentation de la température ou du débit d'air pulsé, la pire des situations étant d'avoir à souffler de grandes quantités d'air très chaud. Aujourd'hui cependant, la généralisation des bâtiments de type BBC dont les besoins de chauffage sont très faibles permet d'envisager à nouveau l'utilisation du chauffage à air.

➤ Situation actuelle

À l'heure actuelle, le chauffage des habitations de type BBC est une opération complexe à réaliser, car il n'existe pas de réponse type à cette question, qui présente parfois certains paradoxes :

- Les besoins de chauffage sont très faibles, mais peuvent varier d'un facteur deux selon les performances des opérations. Ils s'établissent ainsi autour de 15 à 30 kWh/(m².an) ;
- Les puissances spécifiques de chauffage à installer peuvent varier dans des proportions plus importantes encore, car il faut pouvoir répondre aux pics de froid. Elles s'établissent alors autour de 10 à 50 W/m² ;
- Les systèmes de production de chaleur actuels sont mal adaptés pour fournir de si faibles puissances, en particulier pour les chaudières d'une puissance supérieure à 10 kW qui conviennent mieux à présent pour assurer les besoins de chauffage en petit collectif.

Les systèmes de faible puissance couramment utilisés sont alors des PAC, des systèmes de chauffage au bois, des radiateurs électriques et dans quelques rares cas, des chaudières gaz à condensation au fonctionnement bien souvent éloigné de leur régime nominal. À l'exception des radiateurs électriques et des poêles à bois qui servent d'appoint dans les maisons passives, tous ces systèmes apparaissent bien souvent surdimensionnés et sont alors en général couplés à une ventilation performante à récupération de chaleur sur l'air extrait et/ou à un système de production d'ECS, avec une part de production solaire ou thermodynamique (cf. section 1.3.4).

L'utilisation simultanée du réseau de renouvellement d'air pour assurer la ventilation et le chauffage des locaux d'habitation est alors une idée séduisante, qui permet notamment de s'affranchir d'une installation spécifique de distribution de chaleur. Cependant, deux inconvénients majeurs peuvent être soulignés [VABAT, 2009] :

- La réglementation impose une possibilité de régulation du chauffage dans les constructions neuves, ce qui paraît délicat à réaliser en utilisant le principe de la ventilation par balayage imposé par la réglementation relative à l'aération des logements ;
- Pour une même puissance de chauffage demandée et une même température de circulation du fluide caloporteur, le débit volumique d'air à pulser est 3400 fois supérieur à celui de l'eau.

Si en réponse au premier point, il convient de garantir que chaque pièce du logement peut à la fois être chauffée et aérée de manière convenable, le second point impose nécessairement une puissance de chauffage extrêmement réduite, comme expliqué dans l'exemple ci-dessous.

➤ Exemple sur une étude de cas [Fraefel, 2000]

Pour une maison individuelle de type BBC de 100 m² habitables, comprenant quatre pièces principales, une cuisine, une salle de bain et deux cabinets, le débit réglementaire de renouvellement d'air est de 180 m³/h. Avec une puissance de chauffage nécessaire prise égale à 36 W/m², la température de l'air pulsé doit alors être égale à 80°C pour maintenir une température de 20°C dans les différentes pièces du logement. Une telle température de soufflage ne peut pas être retenue, car elle présente des inconvénients trop importants, notamment à cause du risque d'inconfort thermique dans la zone de soufflage, la nécessité de recourir à une production de chaleur à haute température et la carbonisation systématique au dessus de 50°C des poussières contenues dans l'air.

Sans modification de la puissance de chauffage demandée, le chauffage à air n'est alors possible qu'en ayant recours à une augmentation significative du débit d'air pulsé. Ainsi, en limitant la température de soufflage à 40°C pour s'affranchir des phénomènes d'aggrégation et de carbonisation des poussières, le débit d'air nécessaire est porté à 540 m³/h. Dans ces conditions, les sections des gaines doivent être largement augmentées pour limiter les pertes de charge et le bruit aérien, mais les consommations électriques deviennent nécessairement conséquentes et la diffusion d'une telle quantité d'air ne s'effectue pas sans difficultés pour garantir le confort des occupants. De plus, en l'absence d'un récupérateur à très haute efficacité, un fonctionnement en tout air neuf n'est pas envisageable du fait des consommations énergétiques excessives que cela entraînerait. Il serait alors nécessaire d'effectuer une reprise d'air égale au deux tiers du débit total environ, ce qui ne permet pas de garantir la bonne évacuation des polluants en cas d'activité émettrice dans le logement.

Dans une telle habitation, ni l'élévation de la température, ni l'augmentation du débit de l'air pulsé n'apparaissent donc être des solutions tangibles permettant d'envisager convenablement la seule utilisation de l'air de ventilation pour couvrir les besoins de chauffage du logement (cf. Tableau 1.17).

En conséquence, seul un abaissement important de la puissance de chauffage de l'habitation permet d'avoir recours à l'air de ventilation comme unique vecteur énergétique pour assurer à la fois le renouvellement de l'air et le chauffage du logement. En effet, avec une puissance de chauffage réduite à 10 W/m^2 , conformément aux exigences du standard Passivhaus ou du label Minergie P, et avec un débit réglementaire de ventilation conservé à $180 \text{ m}^3/\text{h}$, la température de soufflage de l'air reste inférieure à 37°C , évitant ainsi tout risque d'inconfort pour les occupants (cf. Tableau 1.17).

Tableau 1.17 : Analyse des conditions d'application du chauffage avec l'air de ventilation

Type de bâtiment	BBC classique		BBC Passivhaus	
Surface	100 m^2		100 m^2	
Puissance spécifique de chauffage	36 W/m²		10 W/m²	9 W/m²
Puissance de chauffage nécessaire	3600 W		1000 W	900 W
Débit volumique	$180 \text{ m}^3/\text{h}$	540 m³/h	$180 \text{ m}^3/\text{h}$	$90 \text{ m}^3/\text{h}$
Température de l'air soufflé	80°C	40°C	< 37°C	50°C
Chauffage avec l'air de ventilation	Impossible		Possible	

Enfin, il convient de prendre en considération la modulation du débit de renouvellement d'air, qui peut être réduit à $90 \text{ m}^3/\text{h}$ dans le cas de la maison prise en exemple. Dans ces conditions et en prenant cette fois une température limite de 50°C pour l'air pulsé, la puissance maximale qu'il est possible de transporter avec l'air de ventilation s'établit à 900 W, soit au maximum 9 W/m^2 pour cette habitation, comme indiqué en gras dans la dernière colonne du Tableau 1.17.

C'est suite à ce type de raisonnement que les bâtiments souhaitant répondre au standard Passivhaus doivent présenter une puissance spécifique de chauffage inférieure à 10 W/m^2 . En effet, c'est bien ce critère qui permet le chauffage via l'air de ventilation. La limite des $15 \text{ kWh}_{\text{EP}}/(\text{m}^2.\text{an})$ pour la consommation énergétique annuelle de chauffage rapportée à la surface de l'habitation n'est ensuite que la conséquence des résultats couramment obtenus par simulation thermique dynamique avec des bâtiments dont la puissance de chauffage nécessaire était limitée à 10 W/m^2 .

➤ Quid de la majorité des BBC ?

Dans le cas le plus fréquent de bâtiments de type BBC qui présentent une puissance spécifique de chauffage comprise entre 10 et 50 W/m^2 , il est donc nécessaire de prévoir un appoint de chauffage ailleurs que sur l'air de ventilation. Si l'introduction de radiateurs électriques dans chaque pièce peut être exclue compte tenu de leur consommation excessive en énergie primaire, les solutions restantes impliquent alors la mise en place d'un réseau supplémentaire pour l'émission de la chaleur, sauf dans le cas du choix d'un appareil indépendant de chauffage au bois de faible puissance. Il est dès lors intéressant d'étudier cette dernière solution qui présente toutefois l'inconvénient d'être une source localisée de chaleur, avec près des deux tiers de la puissance obtenue lors de la combustion qui sont délivrés par rayonnement et convection dans la pièce où est installé l'appareil, le tiers restant étant rejeté avec les produits de combustion. Un appareil de chauffage domestique au bois d'une puissance nominale d'environ 6 kW permettrait ainsi de répondre aux puissances spécifiques de chauffage nécessaires dans ce type d'habitation, mais il conviendrait de mieux répartir la chaleur émise pour éviter les risques de surchauffe dans le séjour et permettre une harmonisation de la température de l'ensemble des pièces du logement, en particulier celles étant les plus éloignées de la source.

L'utilisation de l'air de ventilation pour effectuer cette répartition apparaît alors être une solution judicieuse, d'autant qu'avec un système à récupération de chaleur sur l'air extrait, les calories contenues dans l'air vicié peuvent être redistribuées par l'air neuf dans les différentes pièces de vie.

Ainsi, alors que les habitations de type BBC ne présentent pas toutes des performances aussi élevées que celles des réalisations de type Passivhaus et ne peuvent donc pas prétendre à la seule utilisation de l'air de ventilation pour assurer intégralement leurs besoins de chauffage, il est toutefois possible d'y mettre en œuvre un système de récupération et de distribution d'air chaud pour mieux répartir la chaleur émise par une source localisée comme un appareil de chauffage au bois.

➤ **Contraintes et techniques associées**

Dans tous les cas, le bon fonctionnement d'un système de chauffage par circulation d'air chaud dépend fortement de l'étanchéité à l'air de l'habitation. Si celle-ci n'est pas suffisamment étanche, les débits d'air insufflé et aspiré ne correspondront pas aux valeurs calculées ou seront moins bien répartis, entraînant ainsi des problèmes pour l'obtention des températures de confort souhaitées.

Ce type de système requiert également le placement adéquat et soigné des conduites d'air ainsi que des bouches de soufflage et de reprise, non seulement pour limiter les pertes de charge mais aussi pour prévenir d'éventuelles fuites ou d'un refroidissement trop important de l'air chauffé en cas de non isolation des gaines. Le contrôle de la vitesse d'insufflation de l'air est également un facteur prépondérant en termes de confort thermique et acoustique des occupants, surtout dans le cas de forts débits soufflés. Des études sont ainsi menées sur l'optimisation des techniques de diffusion par mélange pour profiter au mieux de l'effet Coanda et limiter le phénomène de stratification thermique. Elles sont aussi portées sur le développement de bouches de soufflage pouvant être contrôlées par les occupants et possédant un fort taux d'induction, ce qui permet un meilleur brassage de l'air chaud avec l'air ambiant et offre la possibilité de réduire l'écart de température et la vitesse d'air, tout en délivrant la même puissance thermique [VABAT, 2009].

➤ **Avantages et inconvénients**

Au titre des avantages, un système de chauffage par circulation d'air chaud permet d'obtenir un réchauffement très rapide des différentes pièces grâce au brassage de l'air. Ce type de système offre en outre la possibilité de coupler la ventilation au dispositif de chauffage et/ou de refroidissement de l'habitation, ce qui permet de supprimer les coûts liés à l'installation des réseaux conventionnels de diffusion de chaleur ou de froid. Même si les bouches de soufflage et de reprise ne doivent pas être entravées, ce type de système permet de profiter librement des différentes surfaces de l'habitation. Des possibilités diversifiées existent pour la régulation de tels systèmes, tant en termes de solutions de déclenchement que de possibilités de variation du débit et de la température de l'air soufflé.

Parmi les inconvénients, l'augmentation du débit d'air soufflé peut entraîner des risques de nuisances sonores et des consommations électriques plus importantes, même si des solutions comme les gaines oblongues par exemple permettent de réduire la taille des réservations pour le passage des réseaux. Le contrôle de la mise en œuvre du système ainsi que la maintenance régulière des filtres et des conduites est un point essentiel pour garantir la bonne tenue des performances de l'installation, le maintien d'une bonne QAI dans le logement et la santé des occupants. Les risques de jets d'air inconfortables et de propagation des vibrations des moteurs de ventilation doivent aussi faire l'objet d'un soin particulier lors de la conception de l'installation.

1.5.3. Systèmes de récupération et de distribution d'air chaud

➤ Solution solaire thermique à air

Il existe différentes solutions de chauffage solaire de l'air, la principale étant celle réalisée communément à travers les vitrages. La bonne orientation du bâtiment et le positionnement adéquat des surfaces vitrées permet ainsi de conserver une stratégie de rafraîchissement passif de l'habitation en été et de favoriser les apports solaires passifs en hiver. La chaleur transmise à l'air du logement ou directement rayonnée par les vitrages peut ensuite être stockée en partie au sein des murs, des planchers ou de matériaux à changement de phase, comme illustré sur la Figure 1.32. Des systèmes solaires passifs spécifiques de préchauffage de l'air entrant dans le bâtiment peuvent parfois être mis en place, tels que des fenêtres pariétodynamiques, des dispositifs de type mur Trombe, ou d'autres capteurs et concentrateurs solaires thermiques à circulation d'air.

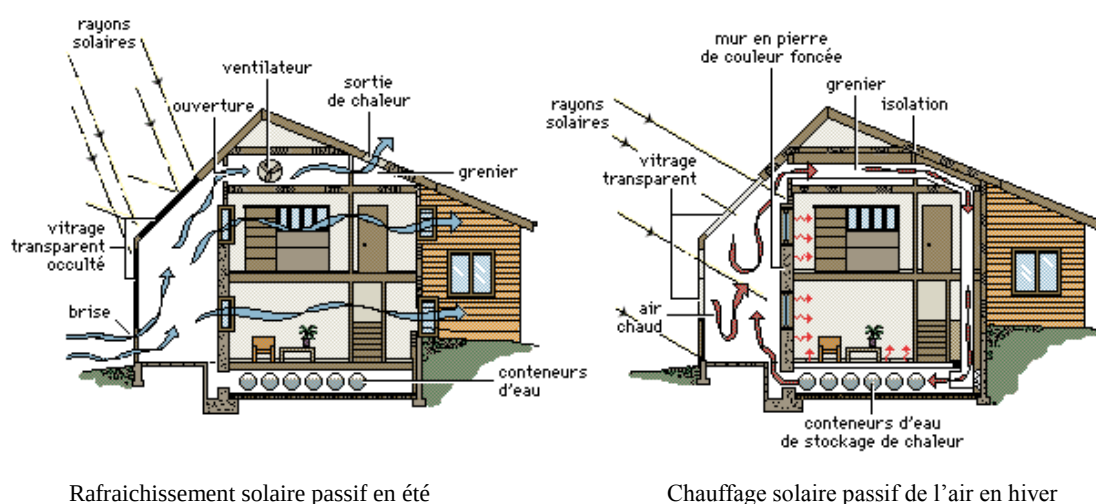


Figure 1.32 : Stratégies solaires passives de rafraîchissement et de chauffage de l'air

Certains systèmes à chauffage solaire fonctionnent avec succès dans de nombreux pays, en particulier dans les régions où le climat n'est pas excessivement froid. Toutefois, les capteurs solaires thermiques à air possèdent des rendements assez peu élevés qui rendent parfois difficile l'élévation de la température de l'air soufflé à l'intérieur du bâti en hiver ou en mi-saison. En effet, compte tenu du ressenti lié à tout déplacement d'air, il est admis qu'une température minimale de 27°C doit pouvoir être atteinte au soufflage pour que le confort des occupants soit conservé. Un dispositif électrique, de type résistance ou PAC, doit alors souvent être utilisé en hiver comme appoint sur l'air insufflé. Les consommations électriques du ou des moteurs de circulation de l'air chaud sont également à prendre en considération, même si certains systèmes sont à présent équipés de capteurs photovoltaïques permettant d'alimenter directement ces auxiliaires [TwinSolar, 2007] [SolarWall, 2010].

Principalement utilisé en sites isolés, ce type de systèmes n'est pas voué à se généraliser dans les habitations de type BBC, principalement du fait des difficultés rencontrées au niveau du contrôle de la température et du débit d'air soufflé, des possibilités limitées de stockage de la chaleur et de l'introduction d'un réseau supplémentaire dans le logement. Les solutions solaires thermiques basées sur l'utilisation d'un fluide caloporteur liquide et associée avec un plancher solaire direct (PSD) ou en appoint de production d'ECS connaissent ainsi un meilleur développement.

➤ Solution d'aération mécanique centralisée à récupération de chaleur

Cette solution correspond au système de VMC-DF avec un échangeur de chaleur entre l'air extrait des pièces de service et l'air insufflé dans les pièces de vie. Il s'agit donc avant tout d'un système de ventilation permettant d'assurer les débits hygiéniques réglementaires. Jusqu'en 2010, les systèmes de VMC-DF à récupération de chaleur étaient peu installés dans le secteur résidentiel français, car il était très difficile de justifier leur coût d'achat élevé, car d'une part leurs performances restaient médiocres, avec une efficacité souvent comprise autour de 60% et la plupart du temps dégradée par la forte perméabilité des habitations, et d'autre part la qualité de leur mise en œuvre, pourtant déterminante, souffrait d'un manque cruel de savoir faire [PREBAT, 2006].

Actuellement, l'utilisation des VMC-DF tend à se généraliser grâce à l'essor des bâtiments de type BBC, dont la forte étanchéité à l'air ne permet pas de se contenter d'un renouvellement d'air par infiltrations ou simple ouverture des fenêtres pour garantir une bonne QAI. En outre, dans ce type de constructions, l'accent est porté sur la réduction des consommations énergétiques. Ces considérations ont ainsi favorisé l'apparition de nouveaux échangeurs dont l'efficacité avoisine les 90%. Il s'agit le plus souvent d'échangeurs statiques à plaques en aluminium ou en matière plastique, fonctionnant à contre courants et affichant une forte compacité³⁹.

De plus, la plupart des modèles sont à présent dotés de moteurs à courant continu et à commutation électronique permettant d'obtenir un débit constant quel que soit l'état d'encrassement des filtres et de réduire les consommations d'électricité liées au fonctionnement des deux ventilateurs. Les centrales VMC-DF sont également équipées d'un dispositif de contrôle manuel, avec une commande permettant de réduire le débit de renouvellement d'air en cas d'absence ou de l'augmenter en cas d'activité émettrice de polluants. Enfin, ces appareils assurent la filtration de l'air insufflé dans le logement et intègrent généralement un by-pass pour souffler l'air neuf sans passer par l'échangeur pendant l'été, ainsi qu'une reprise d'air extrait ou ambiant sur l'entrée de l'air neuf pour la mise hors gel de l'échangeur pendant l'hiver, comme illustré par les schémas de la Figure 1.33.

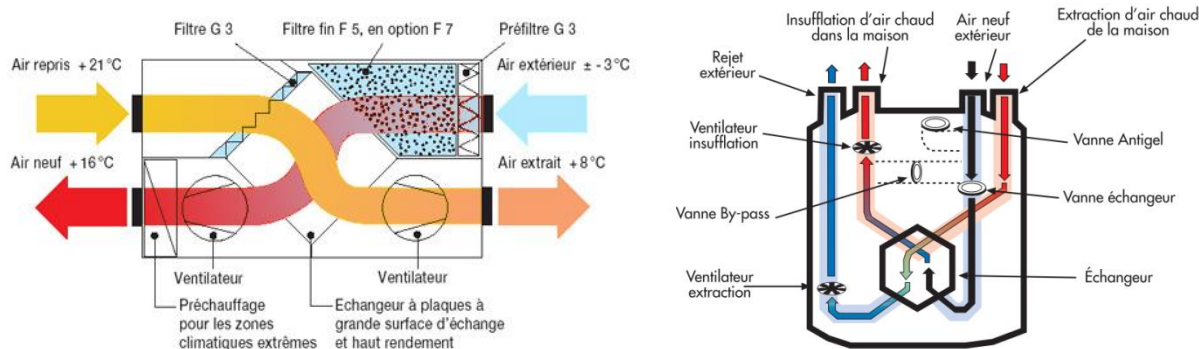


Figure 1.33 : Schémas de fonctionnement de deux centrales VMC-DF à récupération de chaleur

Certains constructeurs proposent également des centrales équipées d'échangeurs enthalpiques qui permettent de récupérer une grande partie de l'humidité contenue dans l'air extrait et de la restituer à l'air neuf insufflé. En effet, grâce à une fine couche de cristaux de sel apposée sur les membranes de l'échangeur, les molécules d'eau contenues dans l'air extrait s'y condensent, puis les traversent suivant le principe de l'osmose, avant d'être absorbées côté air neuf par l'air sec.

³⁹ Compacité [m^{-1}] : Rapport entre la surface d'échange et le volume occupé.

Ces échangeurs évitent ainsi l'assèchement de l'air à l'intérieur des habitations et contribuent à maintenir une hygrométrie confortable comprise entre 30 et 60% dans les pièces de vie. En outre, comme le transfert d'humidité s'effectue sous forme moléculaire, les flux d'air repris et soufflé restent hermétiquement séparés évitant ainsi toute transmission de particules organiques odorantes. L'hygiène du transfert est alors garantie et la récupération de l'énergie contenue dans la vapeur d'eau transférée permet d'améliorer les performances de l'installation par rapport à un échangeur statique, avec une efficacité qui à l'instar des chaudières gaz à condensation peut dépasser 100%.

Le Tableau 1.18 donne quelques exemples de centrales de VMC-DF à haute efficacité actuellement disponibles sur le marché français.

Tableau 1.18 : Exemples de centrales VMC double flux à haute efficacité

Constructeurs	Modèles	Photographies
ALDES	DEE-FLY	
HELIOS	KWL EC	
UNELVENT	AKOR HR	
FRANCE AIR	COCOON 2	
ATLANTIC	DUOLIX	
ZEHNDER	Comfosystems	

Ainsi, moyennant la mise en place d'un double réseau pour l'évacuation de l'air vicié et l'admission de l'air neuf, l'installation d'une VMC-DF à haute efficacité constitue souvent une solution de base dans les habitations de type BBC, d'autant qu'elle est presque toujours associée à un dispositif complémentaire de chauffage ou de refroidissement de l'air neuf insufflé, comme détaillé dans la suite. Il faut toutefois préciser qu'avec ce système et sans émetteur supplémentaire, la puissance de chauffage reste limitée à celle pouvant être transportée par l'air de ventilation.

- VMC-DF / Échangeur air-sol

L'installation d'un puits enterré, appelé aussi puits canadien ou puits provençal, est une solution passive qui est intéressante pour profiter de l'inertie du sol et bénéficier d'un air tempéré, en hiver comme en été, à l'entrée du système de ventilation du logement. En règle générale, la profondeur d'enfouissement se situe entre 1,5 et 2,5 mètres, la longueur des conduits enterrés ne doit pas dépasser 30 mètres pour limiter les pertes de charge et l'espacement entre chaque conduit doit être d'au moins 5 fois leur diamètre pour obtenir un bon échange thermique avec le sol [Hollmuller, 2002].

Il est ensuite courant d'associer un puits enterré à un système de ventilation de type VMC-DF équipé d'un récupérateur de chaleur sur l'air extrait. En hiver, l'air extérieur est ainsi préchauffé jusqu'à une température positive permettant d'augmenter de quelques précieux degrés la température de l'air soufflé après passage dans le récupérateur de la ventilation. En été, l'air frais sortant du puits est directement valorisable et il convient alors de by-passer le récupérateur de la centrale de ventilation pour éviter une augmentation de la température de l'air, comme illustré par la Figure 1.34.

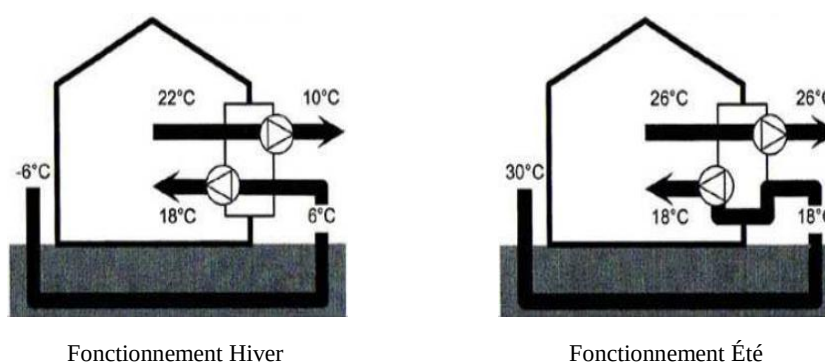


Figure 1.34 : Fonctionnement d'un puits enterré combiné à une récupération de chaleur sur l'air extrait

La réalisation d'un puits enterré impose toutefois d'importants travaux d'implantation qui sont souvent impossibles à effectuer en réhabilitation. De plus, la mise en œuvre doit être particulièrement soignée pour éviter tout risque pour la santé des occupants dans le cas où c'est l'air qui circule dans le puits. La technique nécessite donc une évaluation globale, aussi bien technique que sanitaire. En effet, si la protection de l'entrée du puits permet d'éviter l'introduction de feuilles mortes, de rongeurs ou d'insectes, la maîtrise du développement des moisissures et des bactéries, dont certaines espèces peuvent générer de graves problèmes de santé, est beaucoup plus difficile à obtenir.

Pour s'affranchir de tout risque sanitaire, la solution constituée d'une PAC géothermique utilisant un fluide caloporteur de type eau glycolée est de plus en plus utilisée pour effectuer l'échange des calories entre le sol et l'air de ventilation. Les systèmes de ce type actuellement proposés sur le marché connaissent un franc succès, car ils permettent aussi bien le préchauffage de l'air en hiver que son rafraîchissement en été et font bien souvent partie d'une solution compacte regroupant à la fois une VMC-DF à haute efficacité et un système de production d'ECS pouvant également être relié à des capteurs solaires thermiques.

Enfin, il faut préciser que ce type d'installation est basé uniquement sur le préchauffage de l'air de ventilation et qu'à l'exception des bâtiments répondant au standard Passivhaus, la plupart des habitations de type BBC nécessitent un appoint supplémentaire pour couvrir intégralement leurs besoins de chauffage, comme cela a été vu précédemment.

- VMC-DF / PAC

La version la plus simple de ce type de système consiste à intégrer une PAC réversible au sein d'une VMC-DF contenant par ailleurs un échangeur de chaleur à haut rendement. On parle alors de VMC-DF thermodynamique. En hiver, le système exploite les calories de l'air extrait pour chauffer l'air neuf distribué dans les différentes pièces à vivre. En été, la réversibilité de la pompe à chaleur permet de rafraîchir et de déshumidifier l'air insufflé, sauf quand la température extérieure devient inférieure à celle du logement, auquel cas le système assure automatiquement la surventilation du logement et interrompt le fonctionnement de la PAC. À titre d'exemple, le système Températion® [Aldes, 2010] propose des caissons répartiteurs avec appoints électriques et des modules terminaux de soufflage intégrant des registres motorisés pour apporter le complément de chaleur nécessaire sur l'air lors des périodes hivernales les plus froides tout en assurant la modulation du débit d'air neuf soufflé dans chaque pièce de vie. Le système peut ensuite être complété par des convecteurs ou des panneaux rayonnants électriques pour apporter un appoint de chaleur supplémentaire.

Il existe aussi des systèmes combinés comprenant une VMC-DF à haute efficacité, un ballon de stockage d'ECS et une PAC sur l'air extrait comme unité de production principale de l'eau chaude. Ces systèmes monoblocs constituent ainsi une solution complète pour les bâtiments isolés et étanches, en rassemblant les 4 fonctions que sont la ventilation, le chauffage, le rafraîchissement et la production d'ECS. L'ensemble forme alors une tour compacte qui présente des dimensions standards facilitant son intégration au sein du logement. À l'image de la Vitotres 343 de VIESSMANN qui est un système de référence dans les habitations passives et à très basse énergie en Allemagne, on peut noter le récent développement en France d'une solution similaire par le constructeur HORA appelée Twin'R 4 en 1, qui propose également un appoint par des plénums de diffusion en plafonds rayonnants électriques et dont un schéma général d'implantation et de fonctionnement est proposé par la Figure 1.35.

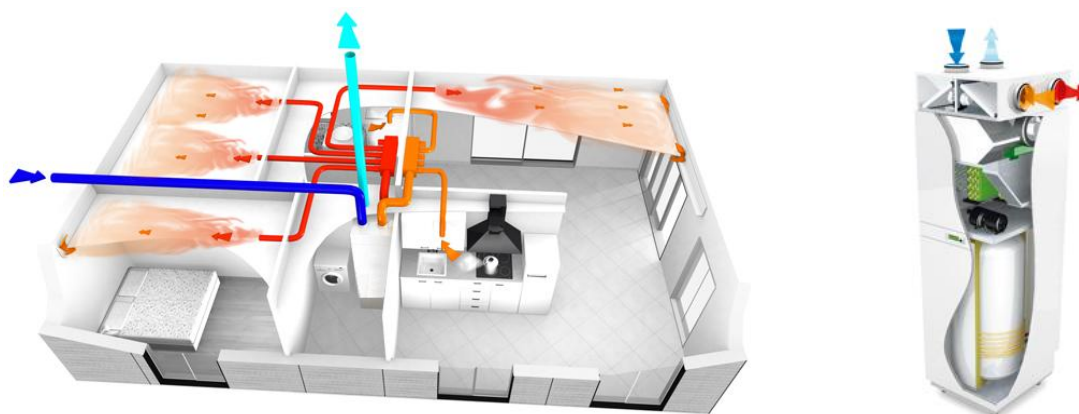


Figure 1.35 : Vues d'un système compact combinant une VMC-DF, une PAC et un ballon d'ECS

Dans ce type de système, le ballon de stockage d'ECS est équipé d'une résistance électrique en appoint et un raccordement est généralement prévu pour un complément solaire thermique ou bois hydraulique. Des connexions permettent aussi l'ajout d'un dispositif auxiliaire de chauffage à basse température de type plancher chauffant. Enfin, pour assurer un rafraîchissement en été, ce n'est plus l'air extrait mais l'air neuf qui circule au niveau de l'échangeur de la PAC prélevant les calories pour la production d'ECS. Cette solution complète nécessite cependant une mise en œuvre particulièrement soignée que seuls des installateurs hautement qualifiés peuvent exécuter. C'est d'ailleurs la principale raison qui retarde encore leur distribution en France par les fabricants étrangers [PREBAT, 2006].

➤ **Solutions de répartition d'air chaud émis par un appareil de chauffage au bois**

Les systèmes de récupération et de distribution d'air chaud (SRDAC) associés aux appareils de chauffage domestique au bois sont des solutions appréciées et souvent mises en place pour mieux répartir la chaleur dans les différentes pièces attenantes et parfois même éloignées de la source. De cette façon, un appareil fonctionnant au bois énergie localisé dans la pièce de vie principale peut devenir un véritable système de chauffage central de l'air dans les habitations de type BBC.

Ces systèmes modifient généralement peu la puissance thermique de l'appareil de chauffage au bois, mais ils permettent en revanche une meilleure répartition de la chaleur dans le logement. Suivant les systèmes, la circulation de l'air chaud peut s'effectuer par convection naturelle ou forcée dans un réseau de gaines de distribution. Par ailleurs, il est essentiel de souligner que ces systèmes ne constituent en aucun cas une solution permettant d'assurer le renouvellement de l'air dans l'habitation. Un système performant de ventilation doit donc impérativement être prévu. De manière générale, deux types de SRDAC pour appareil de chauffage au bois peuvent être distingués :

- Les SRDAC à aspiration

Dans les systèmes à aspiration, l'air de convection provient généralement de l'ambiance. Il est prélevé dans la hotte ou au dessus de l'appareil de chauffage au bois, ou encore dans un carter entourant l'appareil, par un moteur de ventilation situé dans un faux plafond ou dans les combles, avant d'être distribué dans les différentes pièces principales par un réseau de gaines. Il est conseillé que l'amenée d'air comburant soit directement reliée à une prise d'air extérieur, pour ne pas risquer le rejet de produit de combustion dans l'ambiance en cas d'inversion de tirage.

Certains systèmes à aspiration offrent ensuite la possibilité de mélanger, en amont du moteur de ventilation, l'air de convection prélevé autour de l'appareil avec de l'air prélevé à l'intérieur ou à l'extérieur du logement, comme illustré sur les deux représentations données par la Figure 1.36. Ce fonctionnement permet alors d'obtenir une température de soufflage plus douce et plus confortable dans les pièces principales, tout en limitant la mise en dépression de la zone entourant le raccordement de l'appareil au conduit de fumée.

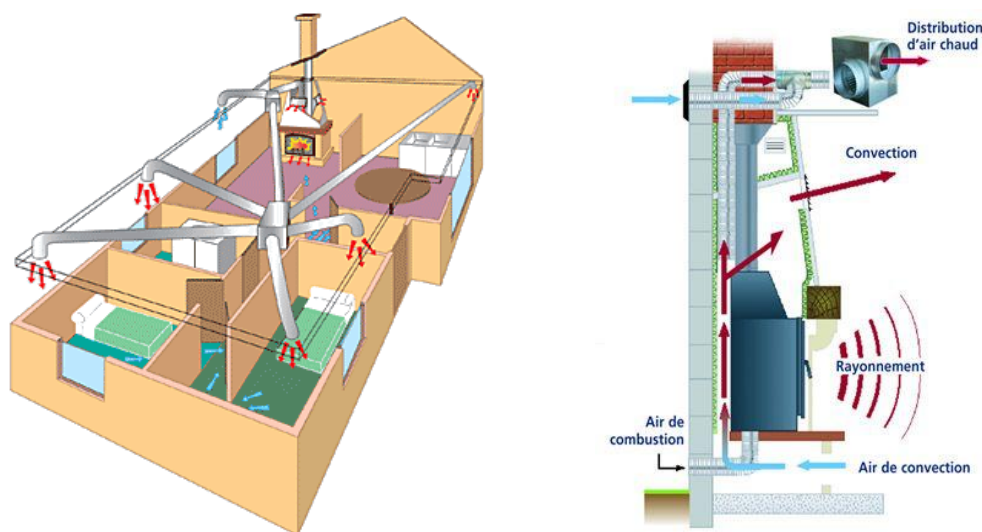


Figure 1.36 : Implantation générale et représentation d'un SRDAC fonctionnant en aspiration

En effet, l'inconvénient majeur des SRDAC à aspiration tient au fait qu'ils favorisent la mise en dépression de l'environnement autour de l'appareil de chauffage au bois, ainsi que le transport des poussières contenues dans la hotte. Ce phénomène peut occasionner une aspiration partielle des gaz de combustion émis par le foyer puis la redistribution dans les pièces d'habitation d'un air pollué pouvant présenter des teneurs anormalement élevées en monoxyde de carbone et par conséquent faire courir un danger aux occupants du logement, comme souligné en 2000 par la commission de sécurité des consommateurs [CSC, 2000]. Cette dernière préconise alors que des textes normatifs soient élaborés pour encadrer l'installation de ce type de systèmes et qu'en attendant, l'habillage des appareils de chauffage au bois doit être conçu de manière à éviter d'éventuelles pénétrations de fumée si un refoulement survenait lors de l'ouverture de la porte de l'appareil.

- Les SRDAC à pulsion

Dans les systèmes à pulsion, l'air de convection peut être prélevé à l'extérieur du logement et/ou dans la pièce où est situé l'appareil de chauffage au bois. Il est ensuite pulsé par un ventilateur situé en partie basse de l'appareil, le plus souvent dans un carter ou un caisson isolé entourant l'insert ou le foyer fermé, avant d'être distribué dans les pièces principales par un réseau de gaines. La mise en pression de l'élément échangeur de chaleur permet alors d'éliminer tout risque de passage des fumées dans le circuit de distribution d'air chaud et limite également le transport des poussières.

Le constructeur de conduits et de sorties de toit métalliques POUJOULAT propose également une gamme de SRDAC à pulsion, appelée CONFORT PLUS et représentée sur la Figure 1.37, dont la particularité est de récupérer une partie de la chaleur au niveau du conduit de cheminée des inserts ou des poêles à bûches. Comme pour la plupart des SRDAC, un thermostat situé à l'intérieur du conduit de soufflage de l'air réchauffé commande le démarrage du moteur de ventilation situé en amont de l'élément échangeur, lorsque la consigne en température imposée par l'utilisateur (généralement fixée entre 30 et 45°C) est dépassée. Pour bénéficier des plus hautes températures des fumées au sein de l'élément échangeur, il est conseillé de le placer directement au dessus de l'appareil, dans une hotte, dans une gaine technique ou dans les combles suivant les cas [Poujoulat, 2011].

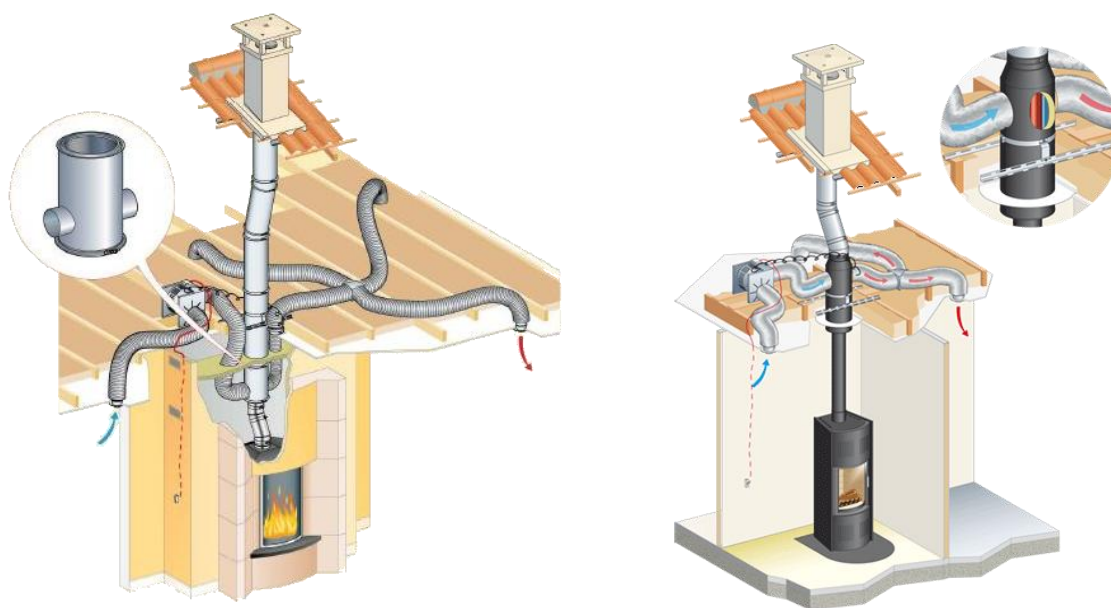


Figure 1.37 : Vues des SRDAC à pulsion pour inserts et poêles à bûches proposées par POUJOULAT

Le constructeur de cheminées FONDIS propose de son côté une solution originale, appelée cheminée à Technologie Multi-Énergie (TME), qui combine un SRDAC à pulsion et une PAC air/air pour former un ensemble permettant à la fois le chauffage et le refroidissement de l'air de convection. Ce dernier est prélevé à l'extérieur ou dans l'ambiance, avant d'être pulsé dans le carter isolé qui entoure l'appareil et dans lequel est installé l'échangeur relié à la PAC permettant de réchauffer l'air en mi-saison lorsqu'il n'apparaît pas nécessaire de faire fonctionner la cheminée et de le rafraîchir en été pour garder une température intérieure inférieure à 26°C. L'air de convection est ensuite insufflé dans les différentes pièces de vie par un réseau de gaines directement relié à l'appareil de chauffage au bois, comme illustré par la Figure 1.38. Un thermostat gère automatiquement le basculement du fonctionnement en mode chaud ou froid de la PAC, qui se désactive complètement lorsque la chaleur de la cheminée suffit à respecter la consigne imposée par les occupants [Fondis, 2009].

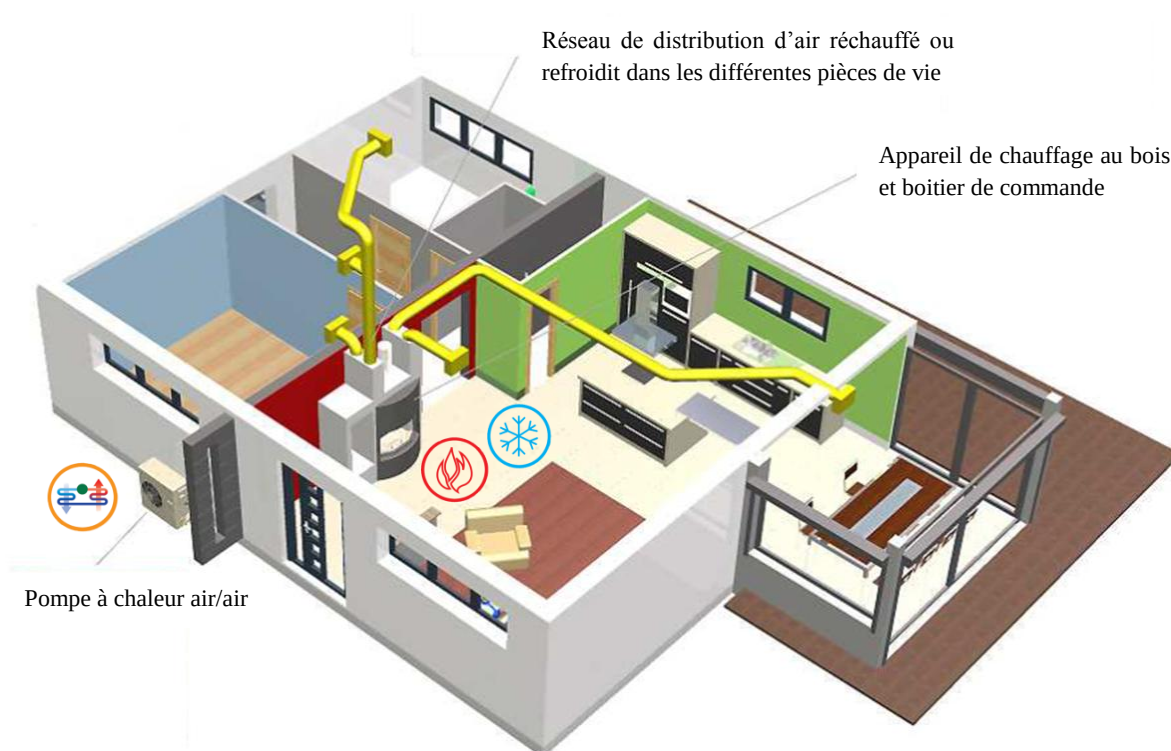


Figure 1.38 : Vue de la solution cheminée à « Technologie Multi-Énergie » proposée par Fondis

Précautions de mise en œuvre

Dans tous les cas, la sécurité de fonctionnement d'un SRDAC ne peut être assurée dans le temps que sous réserve d'une mise en œuvre qui soit conforme aux indications figurant dans le Dossier Technique du dispositif et qui respecte les prescriptions contenues dans les normes NF DTU 24.1 relative aux travaux de fumisterie et NF DTU 24.2 relatives aux différents appareils de chauffage au bois. Enfin, il convient d'adopter une utilisation normale de l'appareil et de prévoir un entretien régulier de l'ensemble de l'installation par un professionnel qualifié.

Le Tableau 1.19 dresse l'inventaire des systèmes de distribution d'air chaud pour inserts visés par un avis technique (ATec) délivré par le groupe spécialisé (GS) n°14 du CSTB en charge de l'évaluation des installations de génie climatique et des installations sanitaires [CSTB_ATec, 2011].

Tableau 1.19 : Inventaire des systèmes de récupération et de distribution d'air chaud pour inserts

Dénomination	Titulaire Date d'enregistrement	N° Avis Technique	Fonctionnement	Description
ATF ANNULÉ le 28/02/2009	SAS Groupe HDT 08/02/2005	14/03-819	Pulsion ou conv. nat.	Groupe en amont d'un carter en béton autour de l'insert, thermostat, air amb. ou extérieur
A2C2 (Active Air Cheminée Concept)	SUPRA SA 15/02/2011	14/05-931*04 Mod	Pulsion ou conv. nat.	Groupe en amont d'un carter en fonte ou en acier autour de l'insert, thermostat, variateur, air amb. ou extérieur
Chemin' Air	AUTOGYRE 15/02/2011	14/06-1101*04 Mod	Aspiration ou conv. nat.	Groupe en aval d'un puisage d'air chaud dans la hotte, thermostat, variateur, by-pass et mélange possible air extérieur
DISTRICHAUFF	CHINVEST SAS 15/02/2011	14/06-1015*03 Mod	Aspiration ou conv. nat.	Groupe en aval d'un puisage d'air chaud dans la hotte, thermostat, variateur, by-pass et mélange possible air extérieur
SDTF (Système Dynamique Turbo Fonte)	TURBO FONTE SA 15/02/2011	14/06-1033*04 Mod	Pulsion ou conv. nat.	Groupe en amont d'un carter en fonte ou en acier autour de l'insert, thermostat, variateur, air amb. ou extérieur
TROPIC, BEACH ou CONVECTION NATURELLE ANNULÉ le 31/01/2010	BRISACH SAS 10/11/2009	14/06-1057	Aspiration ou conv. nat.	Groupe en aval d'un puisage d'air chaud dans la hotte, avec ou sans réseau de conduits, thermostat, variateur.
Aéroval ANNULÉ le 31/07/2010	Société AÉROVAL 01/03/2007	14/07-1107	Aspiration ou Pulsion	Groupe en aval ou en amont d'une hotte ou d'un carter autour d'un insert, thermostat, variateur, air amb. ou extérieur
CONFORT et CONFORT PLUS	POUJOLAT SA 15/02/2011	14/07-1128*02 Mod	Aspiration ou Pulsion	CONFORT : Groupe en aval de hotte ou de carter autour d'un insert, thermostat, variateur. CONFORT PLUS : Groupe en amont d'un conduit échangeur étanche sur conduit de cheminée, thermostat, air amb. ou extérieur
DMO et AIRMAX	DMO 27/10/2010	14/07-1133	Aspiration ou conv. nat.	Groupe en aval d'un puisage d'air chaud dans la hotte, thermostat, variateur, by-pass et té de mélange 40% air extérieur
RAC (Récupérateur d'Air Chaud)	FADIS 27/10/2010	14/07-1139*01 Mod	Aspiration ou conv. nat.	Groupe en aval d'un puisage d'air chaud dans la hotte, thermostat, variateur, by-pass, mélange et registres de zoning.
SDD ou TME (Système de Distribution Dynamique ou Technologie Multi-Énergies)	FONDIS 03/12/2009	14/09-1460*V1	Pulsion	SDD : Groupe en amont d'un carter en acier ou en fonte, variateur asservi au thermostat, by-pass et mélange avec air ext. TME : Groupe équipé d'une PAC réversible sur air extérieur quand l'insert ne fonctionne pas

La compatibilité de l'utilisation d'un SRDAC avec les différents systèmes de ventilation rencontrés dans les habitations est un aspect systématiquement souligné par le GS n°14 du CSTB. En effet, certains équipements comme un appareil de chauffage au bois, un SRDAC, une hotte de cuisine, un sèche-linge, ou encore un aspirateur centralisé peuvent brasser d'importants volumes d'air dans le logement pendant leur fonctionnement et doivent donc être utilisés avec précaution pour ne pas perturber le fonctionnement de la ventilation, en particulier dans les habitations de type BBC fortement isolées et étanches à l'air. Ainsi, pour garantir la sécurité des occupants et le bon renouvellement d'air du logement lors de l'installation d'un SRDAC pour appareil à bois, les dispositions suivantes doivent être respectées [CSTB_ATec, 2011] :

- Pour maintenir la ventilation par balayage, les bouches de distribution d'air chaud ne peuvent pas être mises en place dans les pièces comportant des bouches d'évacuation d'air vicié ;
- Pour éviter tout risque de dysfonctionnement de l'installation ou de refolement des produits de combustion, aucun autre appareil (hotte, aspiration centralisée...) ne doit être raccordé sur un conduit de fumées à tirage naturel dans la pièce où est installé l'appareil ;
- Lorsque le chauffage principal est électrique, les systèmes de distribution d'air chaud sont incompatibles avec une VMC hygroréglable avec entrées d'air hygroréglables (Hygro B). En effet, l'assèchement de l'air intérieur provoqué par la combinaison d'emploi de ces deux systèmes peut réduire le débit d'air neuf à un niveau insuffisant pour assurer une ventilation hygiénique et une bonne QAI dans l'habitation ;
- Lorsque le chauffage principal n'est pas électrique, les systèmes de distribution d'air chaud peuvent être installés dans les logements ventilés par VMC Hygro B à condition que l'entrée d'air de convection soit extérieure, directe en façade et spécifique à l'appareil, ce qui exclut les conduits d'air en vide sanitaire et les cheminées centrales avec amenée d'air par conduit. L'installation est également possible lorsque l'air de convection présente une proportion minimale de 40% d'air extérieur prélevé dans les conditions qui viennent d'être précisées ;
- Dans le cas où l'air de convection est prélevé dans l'ambiance, chaque pièce distribuée doit comporter une ouverture d'au moins 100 cm² pour permettre un retour d'air dans la pièce où est installé l'insert. Elle peut être réalisée par détalonnement des portes ou à l'aide de grilles de transfert entre pièces ;
- Dans tous les cas, il est préférable de privilégier une prise d'air de convection à l'extérieur lorsque cela est techniquement possible, pour une meilleure ventilation des locaux et une température d'air chaud plus faible au niveau des bouches de soufflage.

Enfin, au terme de cette partie, il convient de rappeler que pour tout appareil de chauffage domestique au bois, qu'il s'agisse d'un poêle, d'un insert ou d'une cheminée, son raccordement doit être réalisé en conformité avec la réglementation en vigueur et doit notamment posséder un volet de fermeture. Dans le cas où l'amenée d'air comburant n'est pas spécifique à l'appareil de chauffage au bois, la pièce dans laquelle il est installé doit comporter une entrée d'air complémentaire pour prévenir les risques de refolement. Lorsque cela est possible, il est donc préférable de s'équiper d'appareils à cycle de combustion étanche disposant d'une entrée d'air comburant dédiée pour éviter tout risque pour les occupants et ne pas perturber le fonctionnement de la ventilation [Feist, 2005].

Chapitre 2 :

Conduit échangeur à triple paroi - prototypes et modèle

Le chapitre 2 décrit tout d'abord les études qui ont menées à la réalisation des différents prototypes de conduit échangeur fabriqués par l'industriel POUJOULAT partenaire du projet. La configuration propice à l'intégration du prototype au niveau du conduit de fumée d'un appareil de chauffage au bois et à son couplage avec un système de ventilation est ainsi précisée, en tenant compte de la volonté de pulser l'air au sein du conduit échangeur. Le choix d'un poêle à granulés de bois affichant une très faible puissance et de larges possibilités de régulation s'impose alors pour répondre aux contraintes des habitations de type BBC et aux besoins de cette étude. Les prototypes de conduit échangeur sont constitués de trois tubes concentriques, de manière à former les trois zones d'écoulement nécessaires pour évacuer les fumées, admettre l'air de combustion et réchauffer l'air de ventilation. Le dimensionnement des prototypes tient compte de la limitation des pertes de charge et des contraintes de fabrication. Le protocole et la métrologie utilisée lors des essais de caractérisation des performances des prototypes sont ensuite présentés, avant d'exposer les résultats obtenus en termes de puissances transférées et d'efficacité de l'échange. À ce stade, la nécessité de travailler avec un appareil de chauffage au bois présentant un circuit de combustion étanche est alors soulignée. Un modèle mathématique est ensuite développé dans le but de prévoir les échanges thermiques qui s'opèrent en régime permanent au niveau du conduit échangeur entre les fumées, l'air de ventilation, l'air de combustion et l'environnement extérieur. Les solutions analytiques obtenues donnent les températures de sortie des trois fluides circulant au sein du conduit échangeur à triple paroi non isolé de l'extérieur (CETP-NI). Une courte étude paramétrique est ensuite conduite en se basant sur un ensemble de paramètres d'entrée dont les valeurs sont prises à partir de mesures expérimentales. Il est alors possible d'apprécier l'influence d'une variation de chaque paramètre sur les performances du conduit échangeur et d'être à même de justifier certains choix de conception.

2.1. CONDUIT ÉCHANGEUR POUR POÊLE À GRANULÉS DE BOIS

2.1.1. Phase préliminaire du projet

➤ Contexte et objectif

Dans un contexte fortement marqué par les problématiques énergétiques et environnementales, le secteur du bâtiment est un domaine d'intervention privilégié pour la réduction des consommations d'énergie et des émissions de GES. Comme détaillé dans le Chapitre 1, les bâtiments fortement isolés et particulièrement étanches sont amenés à devenir la norme, formant des enceintes de moins en moins dépendantes des variations et sollicitations extérieures. En conséquence, dans ces bâtiments de type BBC, les besoins de chauffage sont très faibles et le rôle de la ventilation y est déterminant pour garantir la bonne qualité de l'air intérieur, le bien être des occupants et la durabilité de la structure.

Dans les bâtiments affichant les meilleures performances, soit une puissance spécifique de chauffage inférieure à 10 W/m² environ, l'air de ventilation peut alors y être utilisé comme unique vecteur de chauffage. En effet, les besoins sont si faibles que l'appoint de chaleur peut être réalisé directement sur l'air qui est ensuite insufflé dans les différentes pièces, ce qui présente l'avantage indéniable de ne pas avoir à introduire d'autre réseau de distribution de chaleur dans le bâtiment.

Cette mutation performantielle du secteur concerne autant les bâtiments tertiaires que résidentiels, les réalisations nouvelles que les réhabilitations. Dans le cas des réalisations les plus courantes, la puissance spécifique de chauffage s'établit toutefois encore entre 10 et 50 W/m² pendant les jours les plus froids en hiver, ce qui nécessite de prévoir un appoint de chaleur, le plus possible basé sur l'utilisation d'une source d'origine renouvelable.

Dans les bâtiments d'habitation de type BBC, les systèmes de chauffage domestique au bois constituent à ce titre une solution particulièrement appréciée comme alternative aux systèmes PAC, principalement du fait de l'image que possède le combustible bois énergie, des récentes évolutions des performances des appareils, ainsi que de la meilleure organisation de la filière. Néanmoins, dans une habitation BBC, l'installation de ce type d'appareil, qui présente l'inconvénient d'être une source locale de chaleur, risque d'entraîner une surchauffe de la pièce où il est installé et de ne pas garantir une température suffisante dans les pièces les plus éloignées de la source.

La problématique initiale consiste alors à valoriser la chaleur récupérable autour d'un appareil de chauffage au bois pour la distribuer dans les différentes pièces d'une habitation de type BBC, sans perturber les performances de la ventilation et sans risquer la propagation des produits de combustion, dans le but d'assurer une meilleure homogénéité des températures et le confort des occupants.

Dans ce contexte, l'objectif principal du projet est de développer en partenariat avec l'industriel POUJOULAT, premier fabricant européen de conduits de cheminées et de sorties de toit métalliques, un système innovant de chauffage au bois et de distribution d'air chaud garantissant une grande qualité des ambiances intérieures (confort thermique, acoustique, qualité de l'air intérieur) dans les habitations de type BBC, en vue de son développement commercial. Ce système doit permettre la récupération et la distribution de chaleur grâce à de l'air circulant en pulsion au sein d'un conduit échangeur intégré au conduit d'évacuation des fumées d'un appareil de chauffage au bois de type insert, foyer fermé ou poêle.

➤ Essais sur un insert à bûches de bois

Dans un premier temps, les travaux consistent à évaluer les performances et à étudier les possibilités d'optimisation du système CONFORT PLUS développé par l'industriel POUJOULAT. Il s'agit d'un système de récupération et de distribution d'air chaud qui s'adapte sur le conduit de fumée des inserts et qui possède l'originalité de fonctionner en pulsion (cf. section 1.5.3, Figure 1.37).

Entre 2007 et 2008, une première phase expérimentale est ainsi conduite dans les locaux du Centre d'Essais et de Recherche des Industries de la Cheminée (CERIC), un laboratoire de recherche appliquée basé à Saint-Symphorien, créé en 1990 et spécialisé dans les questions liées à l'évacuation des fumées. Cette structure travaille en étroite collaboration avec le Groupe POUJOULAT dans les domaines de la qualité, de la recherche et de l'amélioration continue des produits.

Les premiers essais ont pour but d'évaluer la puissance récupérée par de l'air qui est prélevé dans l'ambiance à proximité d'un insert et qui circule ensuite dans un conduit échangeur de type CONFORT PLUS intégré à la cheminée de l'appareil de chauffage au bois. Ces essais sont réalisés sur un insert à bûches de bois d'une puissance nominale de 15 kW. Deux nouvelles versions de conduit échangeur sont testées, l'une intégrant des chicanes et l'autre des plenums de diffusion.

La Figure 2.1 donne les schémas des deux versions de conduit échangeur testées. Les chicanes qui équipent la première version contraignent l'air à s'élever puis à redescendre dans l'espace annulaire, ce qui favorise l'échange mais implique des pertes de charge importantes. Dans la seconde version, plus proche d'un échangeur à courants parallèles, l'air est introduit indifféremment en partie haute ou basse, puis est guidé au travers de deux plenums de diffusion avant de sortir en partie basse ou haute du conduit échangeur. Les dimensions précisées sur les schémas sont toutes données en mm.

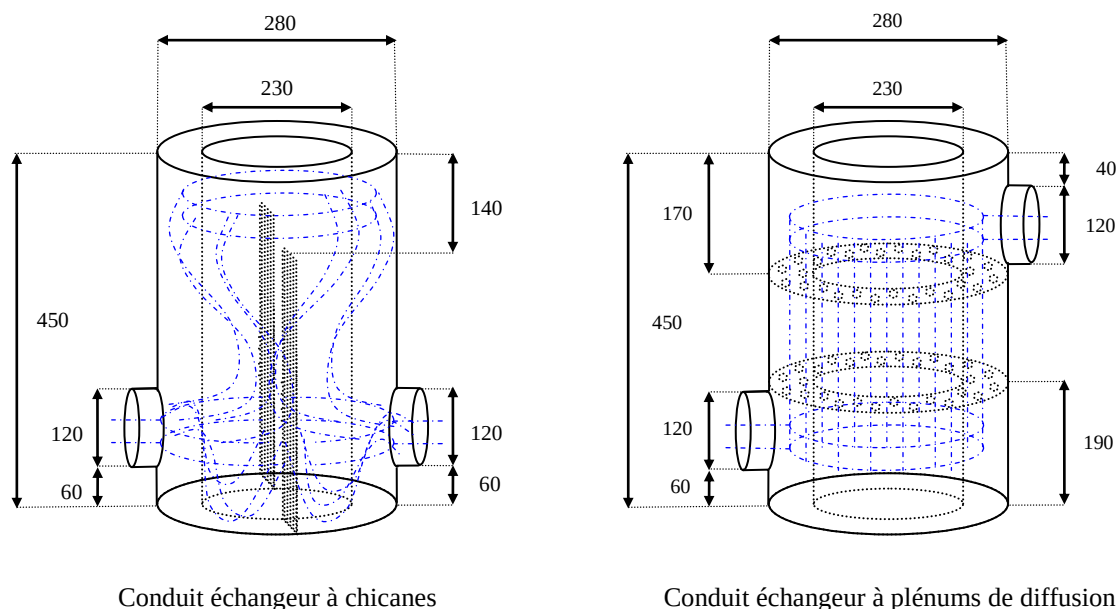


Figure 2.1 : Schémas cotés en mm des deux versions de conduit échangeur testées avec un insert à bûches

Compte tenu des fortes températures (300 à 400°C) et des faibles vitesses (< 1 m/s) à mesurer sur les fumées de combustion, une phase préliminaire aux essais consiste en l'élaboration de protocoles expérimentaux spécifiques et en l'acquisition d'une métrologie adaptée.

Lors des essais, le système est isolé avec soin au niveau du conduit échangeur, qui est volontairement placé au plus près de la buse de sortie des fumées pour bénéficier du meilleur potentiel de récupération de la chaleur, comme le montrent les vues données par la Figure 2.2.



Conduit échangeur à chicanes



Conduit échangeur à plenums de diffusion

Figure 2.2 : Vues des essais des deux versions de conduit échangeur testées avec un insert à bûches

Lorsque le régime permanent est atteint, les puissances transférées sont évaluées grâce à la mesure des débits de chaque fluide et des températures aux différentes extrémités de l'échangeur.

Puissances thermiques échangées : ϕ

En régime permanent et sans changement de phase, la puissance ϕ_i cédée ou récupérée par le fluide i est déterminée à partir de sa masse volumique ρ_i au niveau du lieu de mesure de sa vitesse v_i dans la section d'écoulement S_i , puis de sa chaleur massique moyenne $c_{p,i}$ et enfin de sa différence de température ΔT_i entre les extrémités du conduit échangeur, suivant l'expression :

$$\phi_i = \rho_i v_i S_i c_{p,i} \Delta T_i = C_i \Delta T_i \quad (2.1)$$

avec C_i le débit enthalpique (ou la capacité thermique) du fluide i , tel que : $C_i = \rho_i v_i S_i c_{p,i}$

Efficacité de l'échange : E

L'efficacité de l'échange E est définie par [Incropera, 2006] comme étant le rapport de la puissance utile récupérée $\phi_{\text{utile récupérée}}$ sur la puissance maximum récupérable $\phi_{\text{max récupérable}}$:

$$E = \frac{\phi_{\text{utile récupérée}}}{\phi_{\text{max récupérable}}} \quad (2.2)$$

Dans le cas d'un échange ayant lieu entre deux fluides, notés 1 et 2 :

$$\phi_{\text{max récupérable}} = C_{\min(1;2)} \Delta T_{\max(1;2)} \quad (2.3)$$

$$\text{avec } C_{\min(1;2)} = \min(C_1; C_2) \quad (2.4)$$

$$\text{et } \Delta T_{\max(1;2)} = \max(T_{1,in}; T_{2,in}) - \min(T_{1,in}; T_{2,in}) \quad (2.5)$$

Le Tableau 2.1 donne les principaux résultats obtenus lors de ces essais. De manière générale, la puissance récupérée sur l'air de ventilation avec ce type d'échangeur est comprise entre 400 W et 800 W en phase de fonctionnement, avec une faible efficacité d'échange puisqu'elle est inférieure à 10% pour l'échangeur à chicanes et à 15% pour l'échangeur à pléniums.

Tableau 2.1 : Puissance récupérée et efficacité de l'échange lors des essais avec un insert à bûches

Insert à bûches		Chicanes		Pléniums	
		min	max	min	max
Puissance récupérée	[W]	400	800	400	600
Efficacité de l'échange	[%]	5	8	10	13

La Figure 2.3 regroupe ensuite les graphiques donnant l'évolution de la température des fumées et de l'air de ventilation en entrée et en sortie des conduits échangeurs à chicanes et à pléniums.

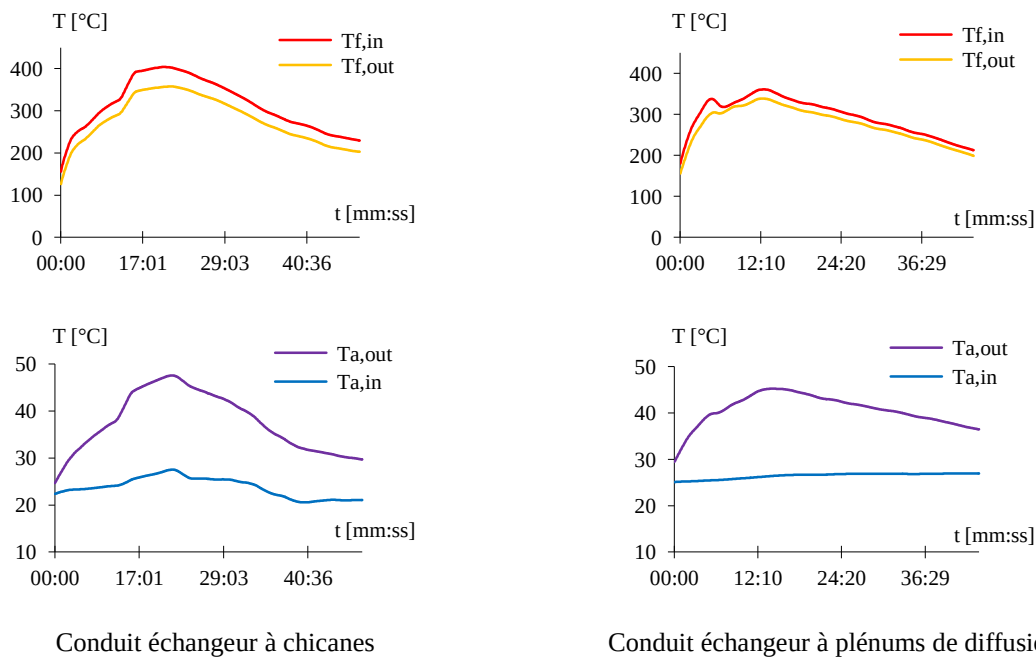


Figure 2.3 : Évolution des températures des fumées et de l'air lors des essais avec un insert à bûches

De manière générale, ces essais ont été fortement marqués par l'instabilité de la source de chaleur. En effet, un régime permanent ne peut pas être instauré avec ce type d'appareil. De plus, avec des fumées s'élevant entre 300 et 400°C au sein du conduit échangeur pour une charge moyenne de 2,2 kg de bûches de bois dans l'insert, la température de l'air pulsé augmente rapidement sans pouvoir être facilement contrôlée. En conséquence, l'insert à bûches apparaît être une source de chaleur trop puissante et surtout difficilement maîtrisable pour répondre aux exigences des logements de type BBC.

➤ **Recours au poêle à granulés de bois**

Face à la difficulté d'obtenir un régime établi avec l'insert à bûches, même en utilisant des bûches de bois densifié, le projet s'oriente ensuite vers l'utilisation d'une source plus stable en température, facilement réglable et de plus faible puissance : *le poêle à granulés de bois*.

Moyennant une faible consommation électrique, les poêles à granulés permettent d'obtenir une combustion régulière du combustible à fort pouvoir calorifique qui est apporté dans le brasero, grâce au contrôle de la quantité d'air comburant admise au niveau d'une buse, qui est généralement située à l'arrière de l'appareil et qui est directement reliée à une prise d'air extérieur. Le raccordement de ce type d'appareils au moyen de conduits concentriques, dits étanches, tend à se généraliser.

Le groupe POUJOLAT commercialise la gamme de conduits étanches DUALIS PGI 80-130, dont un élément est présenté sur la Figure 2.4. Ces conduits concentriques permettent à la fois d'évacuer les fumées par le conduit central et d'admettre l'air de combustion nécessaire au bon fonctionnement du poêle par l'espace annulaire, depuis l'extérieur jusqu'à la prise d'air de l'appareil. Les diamètres des tubes intérieur et extérieur sont respectivement de 80 mm et de 130 mm.

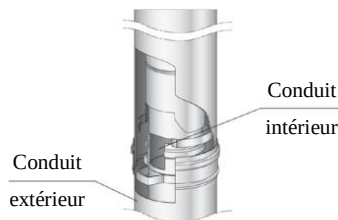


Figure 2.4 : Vue d'un élément de conduit concentrique de la gamme DUALIS PGI

Outre une intégration au bâti facilitée, l'utilisation de ce type de conduit présente le double avantage de prélever l'air de combustion à l'extérieur de l'habitation et de le réchauffer sur toute la longueur du conduit au contact du tube intérieur d'évacuation des fumées. Grâce au premier point, l'étanchéité de la construction est respectée et le système de ventilation n'est pas perturbé par une source prélevant son air de combustion dans l'ambiance. Le second point concerne le préchauffage de l'air comburant qui améliore sensiblement le rendement de la combustion (jusqu'à 10 points de rendement supplémentaires) et diminue le taux de CO dans les fumées [ADEME_R&D, 2009].

Le recours au poêle à granulés, qui est l'un des systèmes de chauffage domestique au bois le mieux adapté aux exigences des habitations de type BBC, impose le développement d'un nouveau genre de conduit échangeur pouvant s'intégrer aux éléments concentriques qui sont couramment utilisés pour raccorder ce type d'appareils.

Ce conduit échangeur devra alors permettre l'échange de chaleur entre les fumées de combustion à évacuer, l'air de ventilation à réchauffer et l'air de combustion à apporter au poêle. Il s'agit donc de développer un échangeur à triple paroi concentrique et à flux séparés. De plus, il faut considérer l'importance de ne pas perturber le système de ventilation mis en place dans les habitations de type BBC. L'air qui circule au sein du conduit échangeur peut alors être soit de l'air neuf qui est prélevé à l'extérieur, soit de l'air déjà présent dans l'habitation et qui est prélevé dans l'ambiance à proximité du poêle. Dans ce dernier cas, le fonctionnement du dispositif s'apparente à celui d'un système de type CONFORT PLUS adapté aux poêles à granulés.

2.1.2. Cahier des charges du conduit échangeur

La définition des critères essentiels du cahier des charges du conduit échangeur à triple paroi pour poêle à granulés est établie en accord avec l'ensemble des membres de la direction technique de l'industriel partenaire du projet.

➤ **Raccordement & Intégration**

Le raccordement du conduit échangeur doit être parfaitement compatible avec la gamme de conduits étanches développée par l'industriel pour équiper les poêles à granulés. Les tubes qui forment le conduit échangeur doivent avoir des diamètres qui correspondent à ceux couramment usinés par l'industriel. Il faut également que l'intégration du conduit échangeur dans la colonne de cheminée soit aisée et que son encombrement soit limité pour pouvoir être installé dans un local technique.

➤ **Simplicité & Robustesse**

Le conduit échangeur doit être le plus simple possible. Il doit être perçu par l'utilisateur comme une « boîte noire » nécessitant peu ou pas de maintenance. Les différents tubes doivent être en acier inox, conformément aux exigences relatives à l'évacuation des produits de combustion et au savoir faire de l'industriel.

➤ **Sécurité & Fonctionnement**

Il est indispensable que l'utilisation du conduit échangeur garantisse la sécurité complète des occupants. L'air doit donc circuler au sein d'une zone de passage totalement étanche comprise entre le tube central d'évacuation des fumées et l'espace annulaire d'admission d'air de combustion. De cette façon, ni la fumée, ni l'air de combustion ne peut venir se mélanger à l'air qui est ensuite soufflé dans l'habitation. À l'image des systèmes de récupération et de distribution d'air chaud les plus récents, l'air que l'on souhaite réchauffer doit être pulsé au sein du conduit échangeur pour poêle à granulés. En effet, le fonctionnement en pulsion est reconnu comme étant plus sûr que le fonctionnement en aspiration. Dans tous les cas, le ventilateur doit donc se situer en amont du conduit échangeur.

➤ **Performances & Adaptabilité**

Les performances de l'échangeur doivent contribuer à répondre aux besoins de chauffage et plus particulièrement à une meilleure répartition de la chaleur dans les bâtiments de type BBC équipés d'un poêle à granulés comme unique appoint de chauffage. La solution de prélever l'air à proximité du poêle à granulés peut être envisagée, mais elle ne correspond pas forcément au fonctionnement optimal attendu d'un système de récupération et de distribution d'air chaud dans un bâtiment de type BBC. En effet, il est important de ne pas perturber la circulation de l'air au sein de l'habitation, telle qu'elle est définie et contrôlée par le système de ventilation mis en place. À ce titre, comme la quantité d'air à réchauffer peut s'avérer importante, voire équivalente au débit total d'air de ventilation, il peut être risqué de prélever la totalité de l'air dans la pièce où est installé le poêle. Ainsi, le choix est fait de développer un conduit échangeur qui soit complètement intégré à la ventilation et qui soit basé sur le chauffage de l'air neuf introduit dans le bâtiment.

Dans les habitations de type BBC, la ventilation est le plus souvent mécanique, bien qu'il existe aussi quelques systèmes de ventilation naturelle assistée, comme exposé dans la partie 1.5. Le couplage du conduit échangeur avec le système de ventilation doit alors être étudié plus en détail.

Couplage avec le système de ventilation

Dans un premier temps, l'air neuf entrant dans l'habitation doit pouvoir être canalisé pour être ensuite pulsé au sein du conduit échangeur. Les systèmes de ventilation mécanique contrôlée à simple flux (VMC-SF) à extraction répartie ou centralisée peuvent donc être compatibles avec la mise en place d'un tel système, à condition de regrouper les entrées d'air et d'installer un réseau complet de soufflage à destination des différentes pièces de vie. Cela entraîne aussi nécessairement l'ajout d'un ventilateur en amont du conduit échangeur sur ce réseau de soufflage de l'air neuf. Ce ventilateur de soufflage étant obligatoire, l'intégration du conduit échangeur au réseau d'un système de ventilation mécanique par insufflation (VMI) présente alors l'intérêt de ne pas rajouter de réseau supplémentaire pour la distribution de l'air et d'utiliser un seul ventilateur. Ces deux possibilités sont illustrées sur le schéma de gauche de la Figure 2.5, avec selon le système de ventilation retenu, la présence ou non d'un ventilateur sur l'air extrait.

Le couplage du conduit échangeur pour poêle à granulés avec un système de ventilation mécanique contrôlée à double flux (VMC-DF) est une solution particulièrement intéressante à envisager, d'autant que ce type de système de ventilation est promis à un fort développement dans les habitations de type BBC. En effet, ce couplage présente l'intérêt de considérer le conduit échangeur comme un élément permettant d'apporter un appoint de chaleur sur l'air neuf déjà préchauffé au niveau de l'échangeur de la centrale de ventilation, comme décrit par le schéma de droite donné par la Figure 2.5. Ici encore, il n'est pas besoin d'introduire de ventilateur supplémentaire et les débits soufflés et extraits sont contrôlés par l'unité de ventilation.

Quelle que soit la configuration de couplage adoptée, il est choisi de conserver une possibilité de dérivation d'une partie de l'air neuf avant son passage au sein du conduit échangeur, comme précisé par les flèches en pointillés bleu sur les deux schémas de la Figure 2.5. En effet, il n'est pas forcément nécessaire de souffler un air très chaud dans la pièce contenant l'appareil de chauffage au bois. Il peut également être souligné que dans le cas d'un couplage avec une VMC-DF, la partie de l'air neuf qui ne circule pas dans le conduit échangeur et qui est directement soufflée dans la pièce de vie principale possède une température qui reste acceptable, puisqu'elle a été réchauffée au sein de l'unité de ventilation. En tenant compte des contraintes de fabrication, une valeur de 125 mm est retenue pour le diamètre des piquages de ventilation sur le conduit échangeur, pour y permettre le passage de la quasi-totalité de l'air de ventilation d'une habitation.

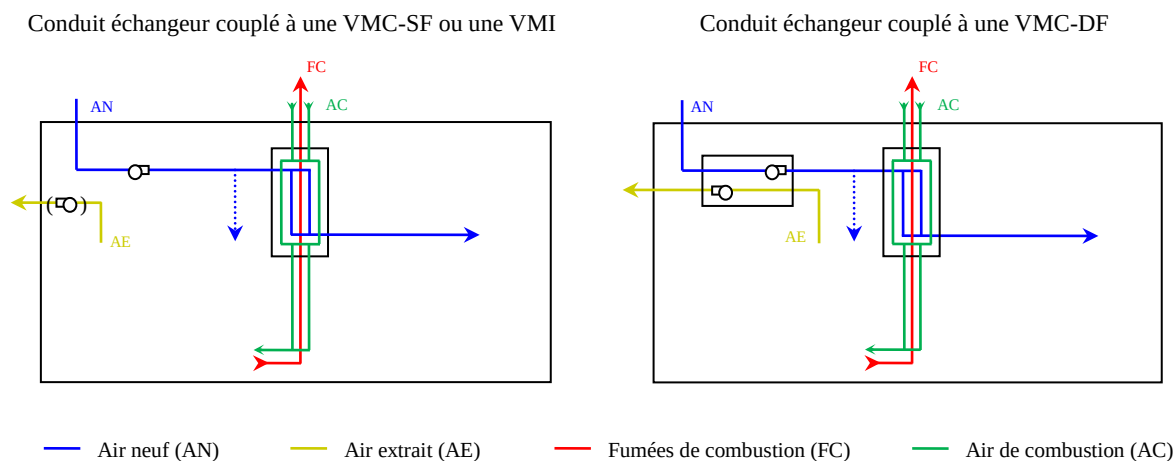


Figure 2.5 : Schémas de couplage entre le conduit échangeur et différents systèmes de ventilation

Synthèse

Dans le cadre de ce travail, la possibilité de réchauffer directement de l'air repris dans le séjour pour le distribuer dans les autres pièces de vie n'est pas retenue, car elle peut entraîner des risques importants de déséquilibre des débits de ventilation dans une habitation de type BBC.

Lorsque le conduit échangeur n'est pas intégré au réseau de soufflage d'un système de ventilation équipé d'un ventilateur, il est nécessaire d'en ajouter un en amont pour y pulser l'air devant être réchauffé. Comme ces configurations ne semblent pas être destinées à un fort développement dans les habitations de type BBC, le travail s'oriente davantage vers une intégration du conduit échangeur dans le réseau de soufflage d'air neuf d'un système de ventilation de type VMI ou VMC-DF.

En particulier, l'association du conduit échangeur avec une VMC-DF semble constituer une réponse pertinente face aux exigences des habitations de type BBC, car elle permet d'apporter un appoint de chaleur sur l'air neuf de ventilation tout en bénéficiant des hautes performances et des possibilités de contrôle de la VMC-DF.

La question de la mise en place d'un dispositif de contrôle de l'air soufflé en aval du conduit échangeur est également posée. C'est en effet une sécurité supplémentaire qu'il convient de prévoir lors des phases d'essai du système, mais l'objectif affiché est de s'affranchir de tout système actif lors de la commercialisation du produit. De la même façon, l'introduction d'un by-pass total ou partiel du conduit échangeur n'est pas retenue, car la question d'une régulation des températures par pièce dans une habitation de type BBC n'est plus aussi pertinente qu'autrefois, où certaines pièces restaient froides dans un souci d'économie de chauffage. Ici, la valorisation d'une partie de la chaleur des fumées de combustion doit permettre de tendre vers une homogénéisation de la température dans les différentes pièces de l'habitation.

Finalement, le conduit échangeur doit apparaître sur le marché comme un composant statique parfaitement intégré au conduit de cheminée et posséder un rôle de facilitateur permettant notamment l'association d'un système de ventilation de type VMC-DF et d'un poêle à granulés de bois. Le Tableau 2.2 propose une synthèse des principaux critères du cahier des charges du conduit échangeur pour poêle à granulés, ainsi que les différentes solutions qui leur sont associées.

Tableau 2.2 : Inventaire des critères et des solutions associées pour la conception du conduit échangeur

Critères	Solutions associées
Raccordement	Compatible avec la gamme PGI 80-130 de l'industriel
Intégration	Encombrement réduit pour tenir dans une gaine technique
Simplicité	Un élément de conduit facilement intégrable (système statique)
Robustesse	Tubes en acier inoxydable
Sécurité	Étanchéité entre les différents fluides
Fonctionnement	Pulsion de l'air dans une calandre entre les fumées et l'air de combustion
Performance	Échange à contre-courants des fumées, immédiatement derrière le poêle
Adaptabilité	Couplage avec tout système de ventilation possédant un réseau de soufflage d'air neuf. Piquages latéraux de raccordement en diamètre 125 mm

2.1.3. Développement de prototypes

➤ Premier prototype

Après validation du cahier des charges par la direction technique du groupe POUJOULAT, un premier prototype de conduit échangeur à triple paroi (CETP) a été réalisé sur la base d'un élément droit de **1000 mm** de la gamme de conduit étanche DUALIS PGI, comme représenté par la vue et le schéma de la Figure 2.6. Les diamètres intérieur, intermédiaire et extérieur sont respectivement de **80 mm, 130 mm et 180 mm**. À l'image des solutions de la gamme CONFORT PLUS, les piquages d'entrée et de sortie de l'air de ventilation sont situés en partie haute du conduit et leur diamètre est de **125 mm**. Enfin, 2 chicanes métalliques sont soudées verticalement sur les 2/3 de la hauteur du conduit intérieur pour inciter l'air de ventilation à descendre puis à remonter dans la calandre.

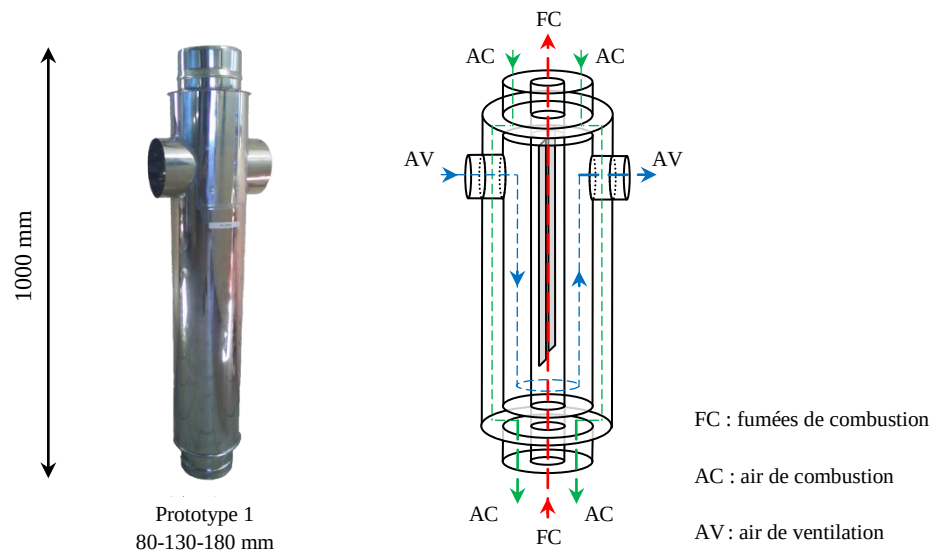


Figure 2.6 : Vue et schéma du premier prototype de conduit échangeur à triple paroi

Dès les premiers essais, il apparaît que ce premier prototype engendre des pertes de charge importantes sur l'air de ventilation (cf. courbe 1 de la Figure 2.10). De plus, compte tenu des faibles diamètres des tubes et de l'absence d'ailettes, les surfaces d'échange du côté des fumées et de l'air de combustion sont assez modestes et valent respectivement **0,27 m²** et **0,28 m²**. Une nouvelle géométrie est alors définie en accord avec la direction technique de POUJOULAT de manière à réduire les pertes de charge et à augmenter la surface d'échange des prochains prototypes du conduit échangeur.

➤ Évolution des prototypes

Tout d'abord, il est décidé de conserver la taille du diamètre du conduit intérieur, soit **80 mm**, pour ne pas perturber l'évacuation des fumées. De plus, aucun traitement n'est apporté sur la surface interne du tube intérieur, ce qui permet de conserver une maintenance habituelle pour ce type de conduit. En outre, Les piquages conservent un diamètre de **125 mm**, mais ils sont à présent situés en partie haute et basse du conduit pour limiter les pertes de charge sur l'air de ventilation. Ensuite, il est proposé d'augmenter la longueur, mais compte tenu des contraintes industrielles de fabrication d'une telle pièce en un seul élément, celle-ci vaut au maximum **1245 mm**. Enfin, **8 ailettes** sont soudées sur la face externe du conduit intérieur, sur toute la longueur disponible entre les piquages, soit 620 mm, de manière à augmenter la surface d'échange entre les fumées et l'air de ventilation.

Enfin, les diamètres des tubes intermédiaire et extérieur sont définis de sorte que pour un débit volumique fixé, les pertes de charge linéaires sur l'air de ventilation et sur l'air de combustion restent similaires respectivement à celles des gaines du réseau de ventilation et à celles de l'espace annulaire d'amenée d'air de combustion du conduit PGI 80-130. La méthode de dimensionnement utilisée consiste alors à retenir les valeurs des diamètres des tubes intermédiaires et extérieur qui permettent de conserver la valeur du diamètre équivalent D_{eq} entre les différentes sections de passage de l'air de ventilation et de l'air de combustion, comme détaillé ci-dessous.

Expression du diamètre équivalent pour une conduite de forme quelconque

Pour un fluide de masse volumique ρ circulant à la vitesse v dans une conduite de forme quelconque de diamètre hydraulique $D_{hyd} = 4 S / P$ et de coefficient de perte de charge linéaire λ_{lin} , la perte de charge linéaire j_{lin} , exprimée en [Pa/m], peut s'écrire en fonction du débit volumique $q_v = v S$, de la section de passage S et du périmètre P , suivant l'expression :

$$j_{lin} = \frac{\lambda_{lin}}{D_{hyd}} \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\lambda_{lin} \rho}{8} \frac{P}{S^3} q_v^2 \quad (2.6)$$

Le diamètre équivalent D_{eq} de cette conduite de forme quelconque correspond par définition [Sacadura, 1993] au diamètre de la conduite circulaire qui affiche la même perte de charge j_{lin} pour le même débit $q_v = v S_{eq}$ de fluide, circulant à la vitesse v au travers de la section circulaire équivalente $S_{eq} = \pi D_{eq}^2 / 4$. La perte de charge linéaire j_{lin} s'écrit alors :

$$j_{lin} = \frac{\lambda_{lin}}{D_{eq}} \frac{\rho v^2}{2} = \frac{8 \lambda_{lin} \rho}{\pi^2} \frac{1}{D_{eq}^5} q_v^2 \quad (2.7)$$

En égalant les expressions (2.6) et (2.7), il est alors possible d'exprimer le diamètre équivalent D_{eq} uniquement en fonction de la section S et du périmètre P d'une conduite de forme quelconque.

$$D_{eq} = \left[\frac{64 S^3}{\pi^2 P} \right]^{1/5} \quad (2.8)$$

Méthode de dimensionnement aéraulique

Les diamètres équivalents des conduites dans lesquelles circulent l'air de ventilation et l'air de combustion avant leur entrée dans le conduit échangeur sont tout d'abord calculés. Puis les diamètres équivalents des espaces annulaires de passage de ces deux fluides au sein du prototype sont évalués. Enfin, le rapport des diamètres équivalents obtenus pour les différentes veines de passage de chaque fluide est effectué. Ainsi, pour que les pertes de charge linéaires soient conservées lors du changement de section de passage pour un fluide en écoulement, il faut que le rapport des diamètres équivalents respectifs soit égal à 1.

En pratique, les diamètres retenus sont ceux qui donnent des ratios légèrement supérieurs à 1, et offrent à ce titre un bon compromis entre la réduction des pertes de charge, le respect des contraintes de faisabilité du constructeur et un encombrement global modéré. Les diamètres qui ont été retenus et validés par l'industriel grâce à cette méthode pour les tubes intérieur, intermédiaire et extérieur des prochains conduits échangeurs valent respectivement 80 mm, 180 mm et 230 mm.

Le Tableau 2.3 donne les ratios des diamètres équivalents obtenus pour le premier et pour les nouveaux prototypes de conduit échangeur.

Tableau 2.3 : Ratios des diamètres équivalents pour les différents prototypes

Ratio des D_{eq} [-]	Premier prototype 80-130-180 mm	Nouveau prototype 80-180-230 mm
Air de ventilation	0,7	1,0
Air de combustion	1,2	1,3

Ces nouvelles dimensions permettent ainsi de réduire de façon significative les pertes de charge sur l'air de ventilation, comme le montrent les courbes 2 et 3 de la Figure 2.10, et dans une moindre mesure aussi sur l'air de combustion. De plus, compte tenu de l'allongement du conduit et de la présence d'ailettes, les surfaces d'échange du côté des fumées et de l'air de combustion sont augmentées et valent à présent respectivement **0,87 m²** et **0,58 m²**.

Vue des nouveaux prototypes

La Figure 2.7 donne une vue des nouveaux prototypes de conduit échangeur réalisés. Les prototypes 2 et 3 se distinguent uniquement par le fait que les piquages sont opposés dans un cas et sont du même côté dans l'autre. Le prototype 2' est quant à lui identique en tout point au prototype 2, mais il ne possède pas le tube extérieur de diamètre 230 mm. Il a été réalisé pour permettre la caractérisation thermique du prototype 2, comme cela sera précisé dans la suite.

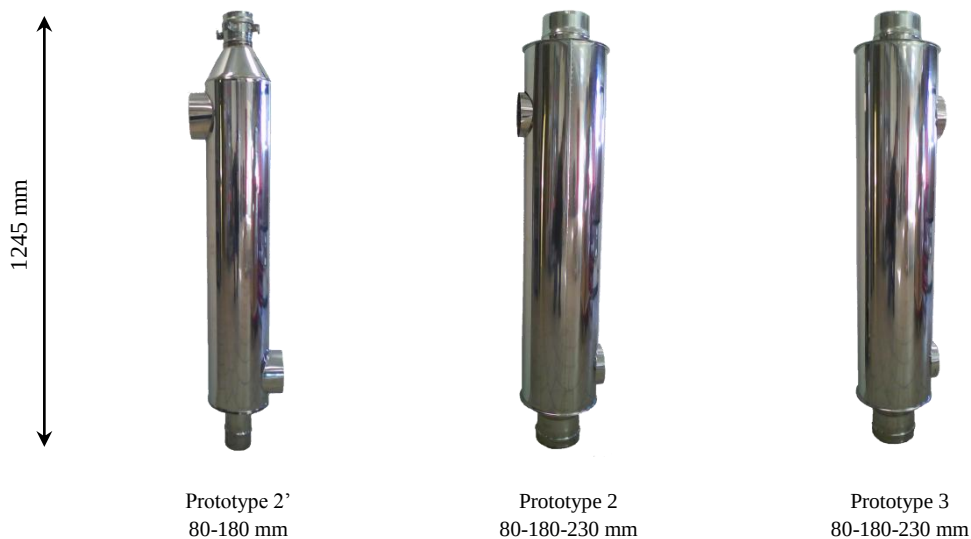


Figure 2.7 : Vue des nouveaux prototypes de conduit échangeur à triple paroi

La Figure 2.8 donne ensuite une représentation du passage des différents fluides dans le prototype de conduit échangeur à triple paroi n°2. L'air de ventilation peut récupérer de la chaleur du côté des fumées, mais aussi du côté de l'air de combustion, qui s'échauffe le long des éléments de conduit précédents avant d'entrer dans le conduit échangeur.

Ce type de conduit échangeur à triple paroi (CETP) permet donc à la fois d'évacuer les fumées de combustion (FC), de chauffer l'air de ventilation (AV) et d'admettre l'air de combustion (AC).

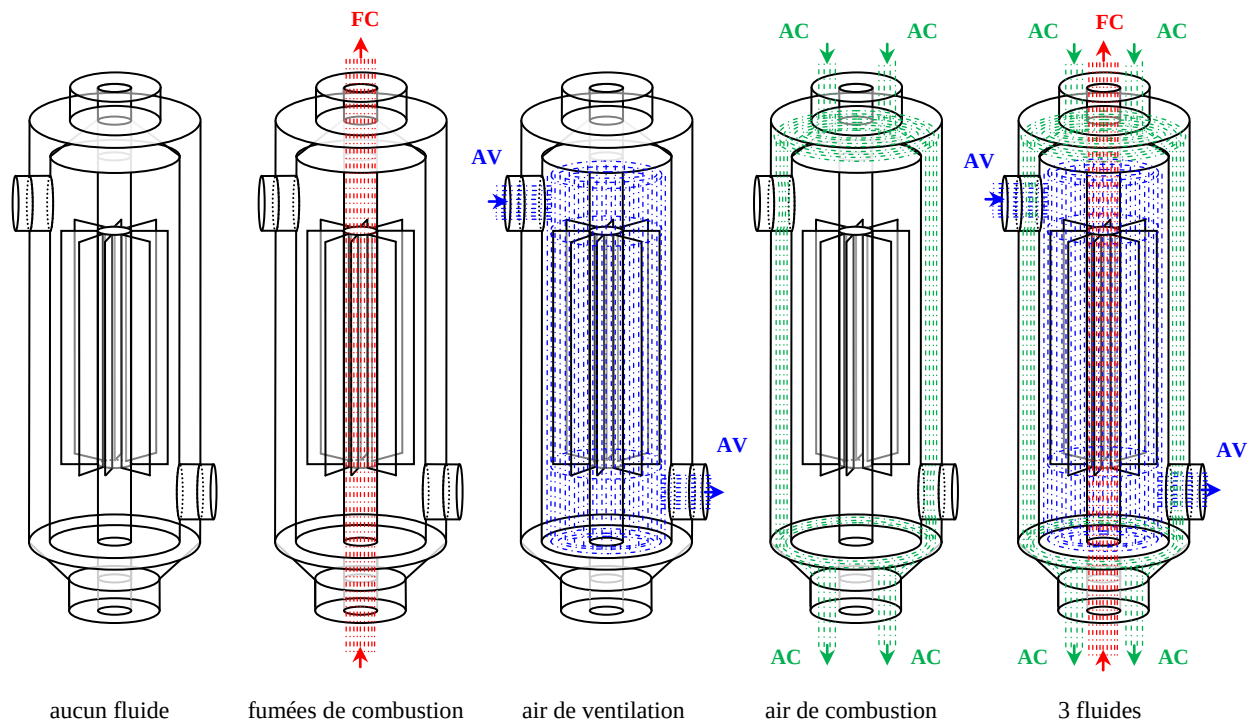


Figure 2.8 : Représentation du passage des différents fluides au sein du prototype n°2 de CETP

Positionnement du CETP

L'objectif du conduit échangeur est de récupérer des calories sur le conduit d'évacuation des fumées de combustion. Or, la température des fumées décroît au fur et à mesure qu'elles s'élèvent dans le conduit. Pour bénéficier du plus fort potentiel de récupération de chaleur, le conduit échangeur doit donc être positionné au plus près de la buse de sortie des fumées du poêle à granulés.

Encombrement du CETP

Comme le conduit échangeur doit être situé au plus près du poêle et qu'il est relié à des gaines de ventilation au niveau des piquages haut et bas, il est important d'un point de vue esthétique qu'il soit placé dans un local technique. L'accès à ce local technique doit alors être suffisant pour effectuer les différentes opérations de maintenance nécessaires. Avec un diamètre extérieur du conduit échangeur de 230 mm et en tenant compte de l'espace nécessaire au raccordement et au passage des gaines de ventilation, le local technique doit présenter des dimensions minimum de 500 mm en largeur et de 400 mm en profondeur, sur toute la hauteur de la pièce.

2.1.4. Caractérisation aéraulique

➤ Pertes de charge sur l'air de ventilation

Les essais de pertes de charge sur l'air de ventilation pour les différents prototypes de conduit échangeur ont été réalisés à Azay le Brûlé (79), dans le laboratoire de recherche et développement de l'industriel VIM, spécialiste de la ventilation. Les essais sur les prototypes 2 et 3 ont été réalisés en novembre 2008, quelques mois après l'essai sur le premier prototype, noté ici prototype 1. La perte de charge ΔP introduite par le conduit échangeur est obtenue grâce à la mesure de la différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'échangeur. La prise de pression a lieu à chaque fois en 2 points de la section droite en amont et en aval du prototype. Ce dernier est positionné à l'extérieur de la chambre d'essai pour des raisons d'encombrement. Le débitmètre à roue axiale donnant q_v est constitué d'une hélice intégrante placée dans un venturi. Il est étalonné par le CETIAT sur une plage de débits allant de 30 à 400 m³/h. La Figure 2.9 donne un schéma de l'installation.

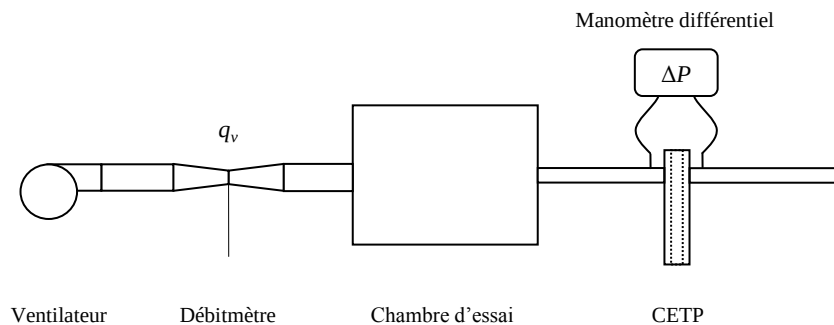


Figure 2.9 : Schéma du banc d'essai des pertes de charge sur l'air de ventilation des CETP

Pour chacun des trois prototypes, la Figure 2.10 donne les valeurs de la perte de charge ΔP mesurée entre les piquages d'air de ventilation en fonction de plusieurs valeurs du débit volumique q_v .

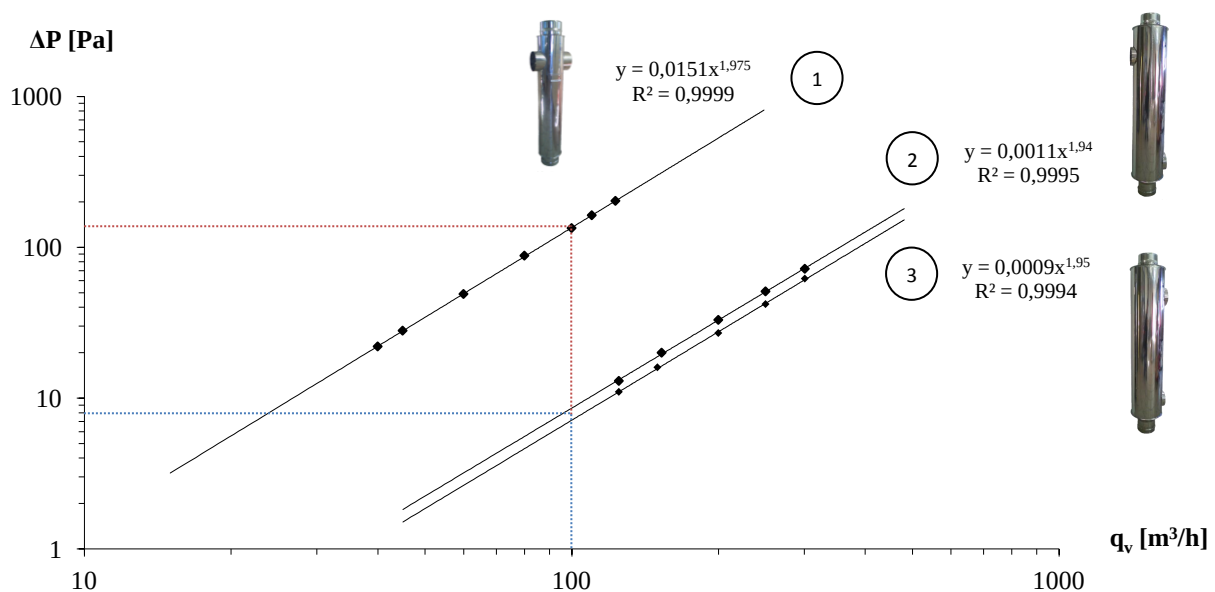


Figure 2.10 : Courbes des pertes de charge sur l'air de ventilation des CETP

Une courbe de tendance de type parabolique passant par l'origine est ensuite associée à chacune des trois séries de points. Pour un même débit volumique, on observe ainsi une diminution très importante des pertes de charge introduites par les prototypes 2 et 3 en comparaison de celles introduites par le premier prototype. À titre d'exemple, les tracés en pointillés pour un débit volumique de 100 m³/h d'air de ventilation au sein de chaque conduit échangeur montrent que les performances aérauliques des nouveaux prototypes sont à présent plus de 10 fois meilleures que celles du modèle initial.

➤ Pertes de charge sur l'air de combustion

Pour évaluer les pertes de charge introduites sur l'air de combustion, un essai a été réalisé au CERIC sur le prototype de conduit échangeur n°2. Le débit d'air de combustion prélevé par un poêle à granulés étant d'environ 20 m³/h, on observe sur la Figure 2.11 que la perte de charge introduite sur l'air de combustion par le conduit échangeur se situe autour de 1 Pa.

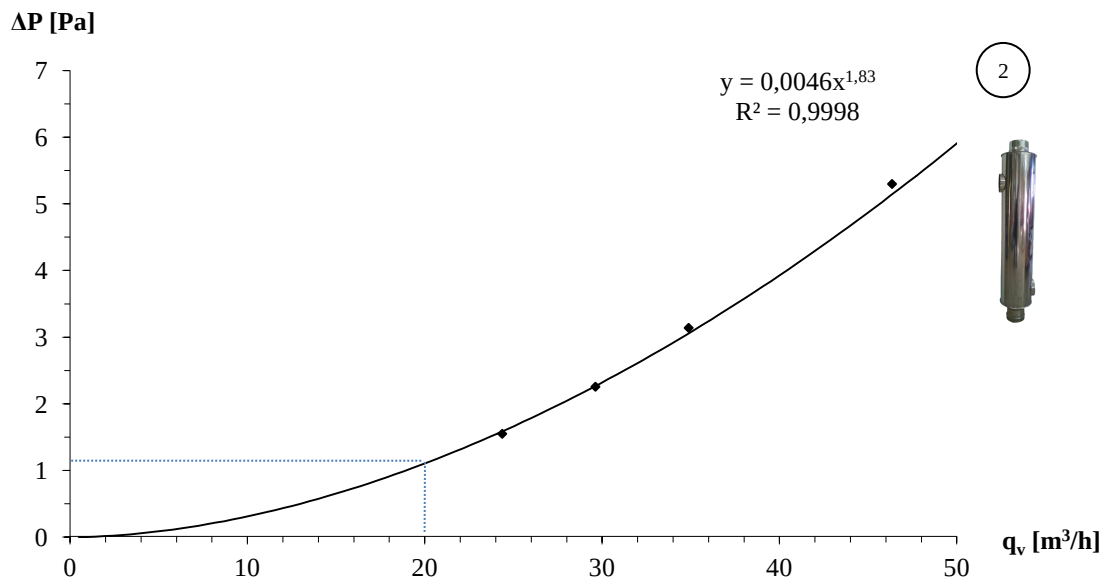


Figure 2.11 : Courbe des pertes de charge sur l'air de combustion du prototype n°2

Bilan des essais de pertes de charge

Les essais de pertes de charge sur l'air de ventilation et sur l'air de combustion permettent de valider le dimensionnement des nouveaux prototypes de conduit échangeur du point de vue de la qualité de leurs performances aérauliques.

Il convient à présent de caractériser d'un point de vue thermique les échanges ayant lieu au sein des nouveaux prototypes de conduit échangeur. Il est décidé d'effectuer cette caractérisation sur le CETP n°2, car l'industriel a également réalisé une version sans paroi extérieure pour ce prototype. Cette version est appelée jusque là prototype 2', mais elle correspond en fait à un conduit échangeur à double paroi (CEDP). La partie suivante concerne ainsi l'évaluation des échanges thermiques ayant lieu au sein des CEDP et CETP n°2.

2.2. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION EXPÉRIMENTALE

2.2.1. Protocole et méthodologie

Les essais sont menés sur les CEDP et CETP n°2 qui sont à chaque fois parfaitement isolés (PI) de l'extérieur. Ces essais doivent alors permettre de valider le fonctionnement global de l'installation, d'évaluer les puissances thermiques échangées en régime permanent entre les différents fluides en présence dans le conduit échangeur et de proposer une loi d'efficacité du système en vue de sa modélisation. Les différentes hypothèses prises en compte lors de ces essais sont précisées :

- Le régime est permanent ;
- Le système est parfaitement calorifugé ;
- Les sections de passage sont constantes ;
- Les fluides ne subissent aucun changement de phase ;
- La conduction thermique au sein des fluides est négligeable ;
- La dépendance en température des propriétés thermophysiques des fluides est prise en compte.

Le protocole des essais de caractérisation thermique du CETP-PI n°2 se décompose en deux phases successives et complémentaires. Tout d'abord, l'étude du prototype 2' ou CEDP-PI n°2, tient pour objectif de caractériser uniquement les échanges entre les fumées et l'air de ventilation. Puis, l'étude du CETP-PI n°2 doit permettre de caractériser l'ensemble des échanges entre les fumées de combustion, l'air de ventilation et l'air de combustion. En effet, la démarche initialement adoptée consiste à déterminer l'efficacité de l'échange entre l'air de combustion et l'air de ventilation grâce à l'évaluation des efficacités du CEDP-PI et du CETP-PI. Pour cela, il faut donc établir une relation entre les différentes efficacités. L'objectif final de ces essais est alors d'évaluer l'ordre de grandeur de la caractéristique globale, notée UA et exprimée en W/K, de l'échange thermique sur l'air de ventilation du côté des fumées, puis du côté air de combustion.

➤ Caractéristique globale de l'échange : UA

Tout d'abord, il convient d'introduire deux paramètres adimensionnels qui sont fréquemment utilisés dans la caractérisation des échanges thermiques entre fluides : il s'agit du nombre d'unité de transfert NUT et du rapport des capacités thermiques minimum et maximum, noté z .

$$NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (2.9)$$

$$z = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2.10)$$

La caractéristique globale UA de l'échange entre deux fluides est définie [Incropera, 2006] comme le produit du coefficient d'échange global U et de la surface d'échange A de référence pour laquelle le coefficient U est valable. En effet, la valeur du coefficient d'échange varie localement le long de la surface d'échange et une valeur globale est généralement prise en compte lorsque les calculs réalisés n'intègrent pas ces variations. Dans le cas d'un échange entre deux fluides, comme c'est le cas lors de la première phase des essais, UA peut être évaluée suivant différentes méthodes.

- Évaluation de UA par la méthode NUT

Dans le cas où la configuration de l'échange est **connue**, la méthode NUT donne l'expression de l'efficacité de l'échange E en fonction du NUT et de z [Incropera, 2006]. La connaissance de $C_{\min}$ permet ensuite de connaître l'expression de la caractéristique globale UA . Pour les configurations à contre-courants et à co-courants, on obtient alors :

$$\text{Contre-courants} \quad E = \frac{1 - e^{-NUT(1-z)}}{1 - z e^{-NUT(1-z)}} \quad NUT = \frac{1}{1-z} \ln \left(\frac{1 - z E}{1 - E} \right) \quad (2.11)$$

$$\text{Co-courants} \quad E = \frac{1 - e^{-NUT(1+z)}}{1 + z} \quad NUT = \frac{-\ln [1 - E(1+z)]}{1 + z} \quad (2.12)$$

Dans le cas où la configuration de l'échange est **inconnue** et lorsqu'on fait tendre z vers 0 par une augmentation significative de $C_{\max}$ par exemple, l'efficacité de l'échange ne dépend plus que du NUT , et ceci quelle que soit la configuration considérée :

$$z \rightarrow 0 \quad E = 1 - e^{-NUT} \quad NUT = \ln \left(\frac{1}{1 - E} \right) \quad (2.13)$$

Dans la première phase de notre étude, UA est tout d'abord évaluée pour $z \rightarrow 0$ en imposant un débit d'air de ventilation maximum dans le système. Ensuite, UA est déterminée pour plusieurs débits de ventilation en faisant l'hypothèse que la configuration d'échange est connue. On suppose alors que l'échange est à contre-courants entre les fumées et l'air de ventilation admis par le piquage haut.

- Évaluation de UA par la méthode DTLM

Cette approche permet d'obtenir la caractéristique globale de l'échange UA , modulo un facteur de correction $F \leq 1$ qui dépend de la configuration de l'échange, en fonction de la puissance thermique échangée ϕ et de la différence de température logarithmique moyenne (DTLM), notée ΔT_{LM} .

$$\phi = F \cdot UA \cdot \Delta T_{LM} \quad (2.14)$$

$$\text{avec} \quad \Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (2.15)$$

Ici, les indices a et b font référence aux extrémités d'entrée et de sortie de l'échangeur. Pour les configurations d'échange à courants parallèles, c'est-à-dire à contre-courants ou à co-courants, on a $F = 1$. Dans ce cas particulier et lorsque la puissance cédée par le fluide 1 est égale à la puissance récupérée par le fluide 2, la puissance échangée ϕ et la caractéristique globale UA s'écrivent :

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_1 = C_1 \Delta T_1 & \text{ou} & & \phi &= \phi_2 = C_2 \Delta T_2 \\ UA &= \frac{C_1 \Delta T_1}{\Delta T_{LM}} & \text{ou} & & UA &= \frac{C_2 \Delta T_2}{\Delta T_{LM}} \end{aligned}$$

Cette méthode suppose que la configuration de l'échange soit **connue**, or ce n'est pas véritablement le cas. Les résultats obtenus devront donc être interprétés avec une certaine prudence.

Phase 1 : Caractérisation thermique du conduit échangeur à double paroi (CEDP)

La Figure 2.12 décrit le banc d'essai et l'instrumentation à prévoir dans le cas de l'étude du CEDP-PI n°2. Lors de cette première phase d'essai, l'air de combustion qui entre par la prise arrière du poêle est prélevé directement dans l'ambiance.

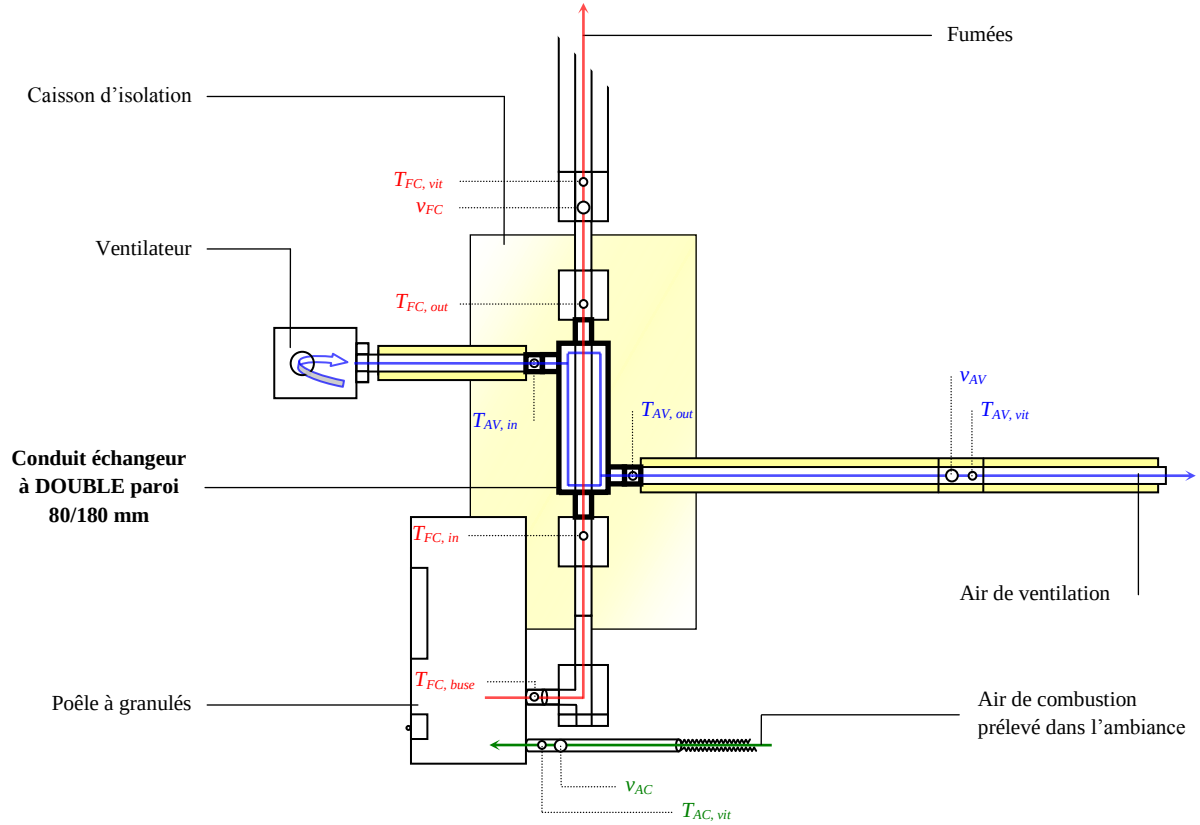


Figure 2.12 : Schéma du banc de caractérisation du CEDP-PI n°2

Les mesures réalisées sur les fumées et sur l'air de ventilation sont utilisées pour effectuer les bilans, tandis que celles ayant lieu sur l'air de combustion ne sont effectuées ici qu'à titre indicatif. La puissance thermique qui est cédée par les fumées ϕ'_{FC} et celle qui est reçue par l'air de ventilation ϕ'_{AV} dans le CEDP-PI n°2 s'obtiennent alors respectivement suivant les expressions :

$$\phi'_{FC} = \rho'_{FC} v'_{FC} S'_{FC} c'_{p,FC} (T'_{FC,in} - T'_{FC,out}) = C'_{FC} (T'_{FC,in} - T'_{FC,out}) \quad (2.16)$$

$$\phi'_{AV} = \rho'_{AV} v'_{AV} S'_{AV} c'_{p,AV} (T'_{AV,out} - T'_{AV,in}) = C'_{AV} (T'_{AV,out} - T'_{AV,in}) \quad (2.17)$$

Quel que soit le débit d'air de ventilation, la capacité thermique minimum C_{min} correspond à celle des fumées. L'efficacité E' de l'échange entre les fumées et l'air de ventilation s'écrit alors :

$$E' = E'_{FC \rightarrow AV} = \frac{C'_{AV} (T'_{AV,out} - T'_{AV,in})}{C'_{FC} (T'_{FC,in} - T'_{AV,in})} \quad (2.18)$$

Phase 2 : Caractérisation du conduit échangeur à triple paroi (CETP)

La Figure 2.13 décrit ensuite le banc d'essai et son instrumentation dans le cas de l'étude du CETP-PI n°2. Lors de cette seconde phase d'essai, l'air de combustion qui entre par la prise arrière du poêle est prélevé à l'extérieur, via le conduit de cheminée concentrique le long duquel il se réchauffe.

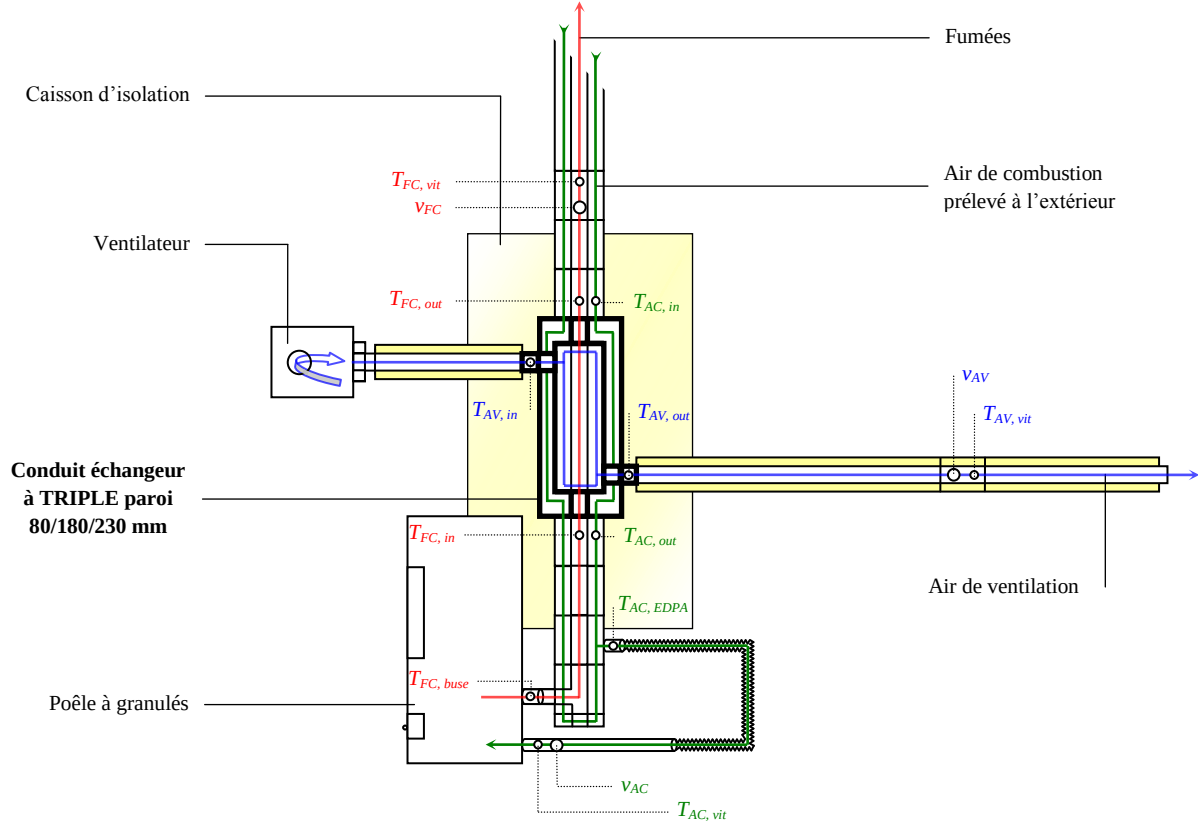


Figure 2.13 : Schéma du banc de caractérisation du CETP-PI n°2

Les puissances thermiques cédées par les fumées ϕ_{FC} et par l'air de combustion ϕ_{AC} ainsi que celle reçue par l'air de ventilation ϕ_{AV} dans le CETP-PI n°2 s'écrivent respectivement :

$$\phi_{FC} = \rho_{FC} v_{FC} S_{FC} c_{p,FC} (T_{FC,in} - T_{FC,out}) = C_{FC} (T_{FC,in} - T_{FC,out}) \quad (2.19)$$

$$\phi_{AC} = \rho_{AC} v_{AC} S_{AC} c_{p,AC} (T_{AC,in} - T_{AC,out}) = C_{AC} (T_{AC,in} - T_{AC,out}) \quad (2.20)$$

$$\phi_{AV} = \rho_{AV} v_{AV} S_{AV} c_{p,AV} (T_{AV,out} - T_{AV,in}) = C_{AV} (T_{AV,out} - T_{AV,in}) \quad (2.21)$$

Il convient ensuite de considérer l'objectif de l'échangeur [Sorlie, 1962] [Sekulic, 1995a] pour déterminer l'expression de la puissance utile récupérée $\phi_{\text{utile récupérée}}$ au sein du CETP :

$$\phi_{\text{utile récupérée}} = C_{AV} (T_{AV,out} - T_{AV,in}) \quad (2.22)$$

Ensuite, dans le cas d'un échange entre trois fluides, où le fluide 2 échange à la fois avec le fluide 1 et avec le fluide 3, la puissance maximum récupérable $\phi_{\max \text{ récupérable}}$ s'écrit [Sekulic, 1995b] :

$$\phi_{\max \text{ récupérable}} = C_{\min (1; 2)} \Delta T_{\max (1; 2)} + C_{\min (3; 2)} \Delta T_{\max (3; 2)} \quad (2.23)$$

Après quelques essais préliminaires et quel que soit le débit d'air de ventilation appliqué, il apparaît que la capacité thermique de l'air de ventilation C_{AV} est toujours supérieure à la somme des capacités thermiques des fumées C_{FC} et de l'air de combustion C_{AC} . L'efficacité globale E de l'échange entre les fumées, l'air de combustion et l'air de ventilation s'écrit alors :

$$E = \frac{C_{AV} (T_{AV, out} - T_{AV, in})}{C_{FC} (T_{FC, in} - T_{AV, in}) + C_{AC} (T_{AC, in} - T_{AV, in})} \quad (2.24)$$

Dès lors, il apparaît que l'expression de l'efficacité E' du CEDP-PI ne peut pas être retrouvée dans celle de E du CETP-PI, car non seulement les paramètres d'entrée relatifs aux capacités thermiques des fumées et de l'air de ventilation ne peuvent pas être rigoureusement identiques compte tenu des conditions d'essais, mais les températures de sortie des fumées et surtout celle de l'air de ventilation sont également modifiées entre les deux phases d'essais du fait de l'échange côté air de combustion, d'où les notations différentes utilisées dans les équations (2.16) et (2.19), ainsi que dans les équations (2.17) et (2.20).

À ce stade, la caractérisation précise des échanges entre l'air de ventilation et l'air de combustion est donc abandonnée. Les essais ont à présent pour but d'évaluer les différentes puissances échangées, ainsi que l'efficacité des échanges dans chacune des configurations. Le Tableau 2.4 donne l'inventaire des mesures à réaliser lors de ces essais.

Tableau 2.4 : Inventaire des mesures à réaliser lors des essais de caractérisation thermique

Fumées de combustion		
$T_{FC, buse}$	[°C]	Température des fumées à la buse d'évacuation du poêle
$T_{FC, in}$	[°C]	Température des fumées à l'entrée du conduit échangeur
$T_{FC, out}$	[°C]	Température des fumées à la sortie du conduit échangeur
v_{FC}	[m/s]	Vitesse moyenne des fumées
$\sigma(\text{CO}_2)$	[%]	Taux de CO_2 moyen des fumées
Air de ventilation		
$T_{AV, in}$	[°C]	Température de l'air de ventilation à l'entrée du conduit échangeur
$T_{AV, out}$	[°C]	Température de l'air de ventilation à la sortie du conduit échangeur
$T_{AV, vit}$	[°C]	Température de l'air de ventilation au lieu de prise de la mesure de la vitesse
v_{AV}	[m/s]	Vitesse moyenne de l'air de ventilation
Air de combustion		
$T_{AC, in}$	[°C]	Température de l'air de combustion à l'entrée du conduit échangeur
$T_{AC, out}$	[°C]	Température de l'air de combustion à la sortie du conduit échangeur
$T_{AC, EDPA}$	[°C]	Température de l'air de combustion à la base du conduit
$T_{AC, buse}$	[°C]	Température de l'air de combustion à la buse d'admission du poêle
v_{AC}	[m/s]	Vitesse moyenne de l'air de combustion

➤ **Masse volumique et chaleur massique : ρ et c_p**

- Fumées de combustion

La masse volumique et la chaleur massique des fumées sont calculées d'après les formules de la norme EN 13384-1 révisée en août 2008, relative aux méthodes de calcul thermo-aéraulique dans les conduits de fumée ne desservant qu'un seul appareil [NF_EN_13384-1, 2008].

Pour le calcul de la masse volumique des fumées ρ_{FC} , exprimée en kg/m^3 , le comportement du fluide est assimilé à celui d'un gaz parfait avec une constante des gaz des fumées r_{FC} qui est fonction de celle de l'air r_{air} et du taux moyen en dioxyde de carbone des fumées $\sigma(\text{CO}_2)$. L'expression dépend également de la pression absolue P_{abs} et de la température $T_{FC, vit}$ relevée au lieu de mesure de la vitesse des fumées.

$$\rho_{FC} = \frac{P_{abs}}{r_{FC}(T_{FC, vit} + 273,15)} \quad (2.25)$$

Avec $r_{FC} = r_{air} [1 - 0,001\sigma(\text{CO}_2)]$ en $[\text{J}/(\text{kg.K})]$ et $r_{air} = 288 \text{ J}/(\text{kg.K})$

Quant au calcul de la chaleur massique des fumées, notée $c_{p, FC}$ et exprimée en $\text{J}/(\text{kg.K})$, il s'obtient en fonction de la température moyenne des fumées T_{FC} et du taux moyen en dioxyde de carbone des fumées $\sigma(\text{CO}_2)$:

$$c_{p, FC} = 1011 + 0,05T_{FC} + 0,0003T_{FC}^2 + \frac{(11,6 + 0,015T_{FC} - 0,000012T_{FC}^2)\sigma(\text{CO}_2)}{1 + 0,0091\sigma(\text{CO}_2)} \quad (2.26)$$

- Air de ventilation et air de combustion

La masse volumique $\rho_{air sec}$ (Figure 2.14) et la chaleur massique $c_{p, air sec}$ (Figure 2.15) de l'air sec entre 250 et 400 K à la pression atmosphérique sont calculées à l'aide de lois de corrélation obtenues d'après les valeurs de la table des propriétés thermophysiques de l'air [Incropera, 2006] :

$$\rho_{air sec} = -3,253 \cdot 10^{-8} T_{air sec}^3 + 4,266 \cdot 10^{-5} T_{air sec}^2 - 2,07277 \cdot 10^{-2} T_{air sec} + 4,4187 \quad (2.27)$$

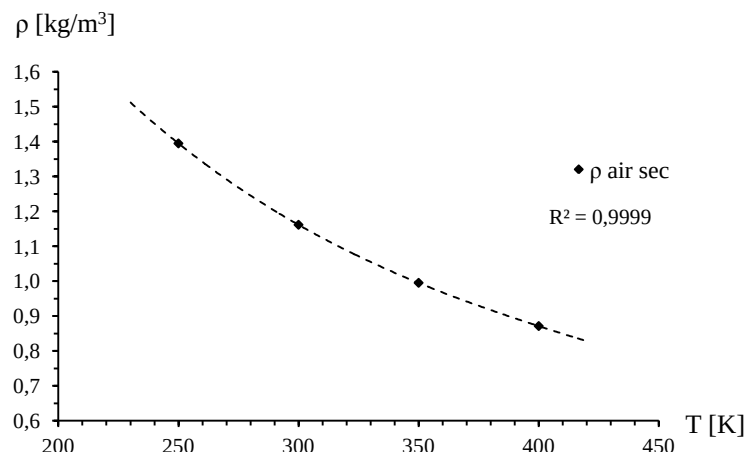


Figure 2.14 : Variation de la masse volumique de l'air sec entre 250 K et 400 K

$$c_{p, \text{air sec}} = 2,67 \cdot 10^{-6} T_{\text{air sec}}^3 - 2,2 \cdot 10^{-3} T_{\text{air sec}}^2 + 0,623 T_{\text{air sec}} + 946 \quad (2.28)$$

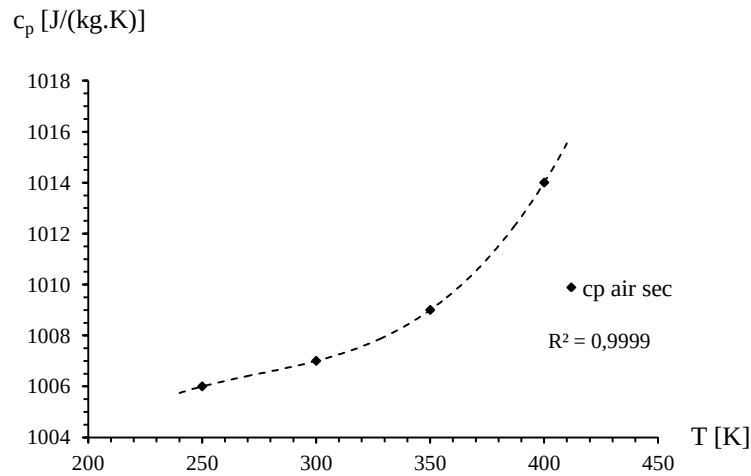


Figure 2.15 : Variation de la chaleur massique de l'air sec entre 250 K et 400 K

➤ Taux moyen de dioxyde de carbone : $\sigma(\text{CO}_2)$

Le taux moyen de dioxyde de carbone $\sigma(\text{CO}_2)$ est utilisé dans le calcul de la masse volumique et de la chaleur massique des fumées de combustion. Les premiers calculs sont menés avec les valeurs relevées dans le rapport d'essais n°737 sur l'évaluation des performances du poêle à granulés de bois LISA du fabricant ECOTECK. Ce rapport a été réalisé par le laboratoire CERIC avec un raccordement de l'appareil à un conduit d'évacuation DUALIS PGI. Cependant, dans le cadre de nos essais, la hauteur du conduit de cheminée et la vitesse du ventilateur d'extraction ne correspondent pas à celles du rapport d'essai. Le taux moyen de dioxyde de carbone dans les fumées est donc mesuré pour chacune des trois allures principales de l'appareil de chauffage étudié, notées P1-V1, P3-V3 et P5-V5. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Taux moyen de dioxyde de carbone dans les fumées en fonction du régime du poêle LISA

$\sigma(\text{CO}_2)$ en [%]	P1-V1	P3-V3	P5-V5
Rapport d'essais n°737	4,2	5,0	6,4
Mesures sur banc d'essai	4,0	4,5	5,0

Lors de nos essais, la combustion s'effectue avec un excès d'air légèrement plus important que lors des essais rapportés par le CERIC. Cette différence fait suite à une petite augmentation de la vitesse de rotation du ventilateur aspirant l'air de combustion et refoulant les fumées, ce qui explique le plus faible taux de CO_2 mesuré dans les fumées.

➤ Traitement des données

Un fichier de traitement des données a été réalisé sous Excel en langage Visual Basic for Applications (VBA). Il permet d'exploiter rapidement les grandeurs mesurées, ainsi que de synthétiser sous forme de tableaux et de visualiser sous forme de graphiques les différents résultats des essais.

2.2.2. Principaux composants du banc d'essai

➤ Le poêle à granulés de bois

On dispose d'un poêle à granulés fabriqué par ECOTECK. Il s'agit du modèle LISA, dont une vue est proposée sur la Figure 2.16. C'est le plus petit appareil de la gamme avec une puissance nominale de 5,5 kW. Ses principales caractéristiques techniques sont données dans le Tableau 2.6.



Figure 2.16 : Vue du poêle à granulés LISA du fabricant ECOTECK

L'appareil dispose de 5 niveaux de puissance qui sont automatiquement associés à une allure du ventilateur d'air de convection en façade. Les réglages vont alors de P1-V1 à P5-V5. D'autres réglages d'usine permettent d'associer à chaque niveau de puissance un couple de paramètres définissant l'alimentation en granulés de bois (ou pellets) et la vitesse d'extraction des fumées. Les valeurs de ce couple pellet/fumée peuvent être modifiées dans une moindre mesure par l'utilisateur en fonction de la qualité du pellet et des conditions d'extraction des fumées.

Tableau 2.6 : Caractéristiques techniques du poêle à granulés LISA

Dénomination	Unité	Valeurs
Puissance calorifique min/nom/max	[kW]	2,5 / 5,5 / 5,6
Consommation de granulés min/max	[kg/h]	0,5 / 1,2
Capacité de stockage du réservoir à granulés	[kg]	15
Diamètre des granulés à utiliser	[mm]	6
Autonomie de fonctionnement min/max	[h]	12,5 / 30
Rendement de l'appareil	[%]	> 84
Puissance électrique consommée au démarrage	[W]	150
Puissance électrique consommée en fonctionnement	[W]	100 à 110
Poids net	[kg]	85
Diamètre du tuyau d'entrée d'air de combustion	[mm]	35
Diamètre du tuyau d'évacuation des fumées	[mm]	80
Dimensions : longueur / profondeur / hauteur	[mm]	450 / 450 / 900

Il existe deux modes de fonctionnement de l'appareil, suivant qu'une température de consigne est fixée ou non par l'utilisateur. Dans le premier cas, le poêle suit un cycle de fonctionnement normal jusqu'à ce que la température de consigne soit atteinte par la sonde de température ambiante située à l'arrière de l'appareil. L'appareil adopte ensuite un fonctionnement économique en jouant sur les valeurs du couple pellet/fumée. Dans le second cas, aucune température de consigne n'est fixée et le poêle travaille en continu à la puissance demandée, donc suivant un couple pellet/fumée donné. En régime permanent, la température de sortie des fumées oscille alors autour d'une valeur moyenne comprise entre 180 et 220°C selon la puissance choisie.

Une mise en sécurité de l'appareil permet de ralentir automatiquement le fonctionnement du poêle dans le cas où la température de sortie des fumées atteint une valeur trop élevée. Cette dernière est fixée par défaut à 269°C. Le poêle opère alors à son plus faible niveau de puissance jusqu'à ce que la température des fumées descende sous une valeur normale de fonctionnement. Enfin, il est possible de programmer jusqu'à deux allumages et extinctions automatiques de l'appareil par jour.

La Figure 2.17 détaille le fonctionnement de l'appareil. Les granulés initialement contenus dans la réserve (7) sont acheminés dans le brasier (3) par la vis sans fin (1). L'allumage s'effectue grâce à la résistance électrique (2) qui enflamme les granulés et l'air de combustion (5). Les gaz issus de la combustion primaire rencontrent alors le déflecteur (8) puis sont brûlés à nouveau avec l'air de combustion secondaire dont une partie passe devant la vitre pour éviter son noircissement. Les fumées passent ensuite à travers l'échangeur en acier inox (6) où elles réchauffent l'air ambiant soufflé en façade par le ventilateur axial, avant d'entrer dans le conduit d'aspiration des fumées (4) et de sortir par le conduit d'évacuation des fumées (9).

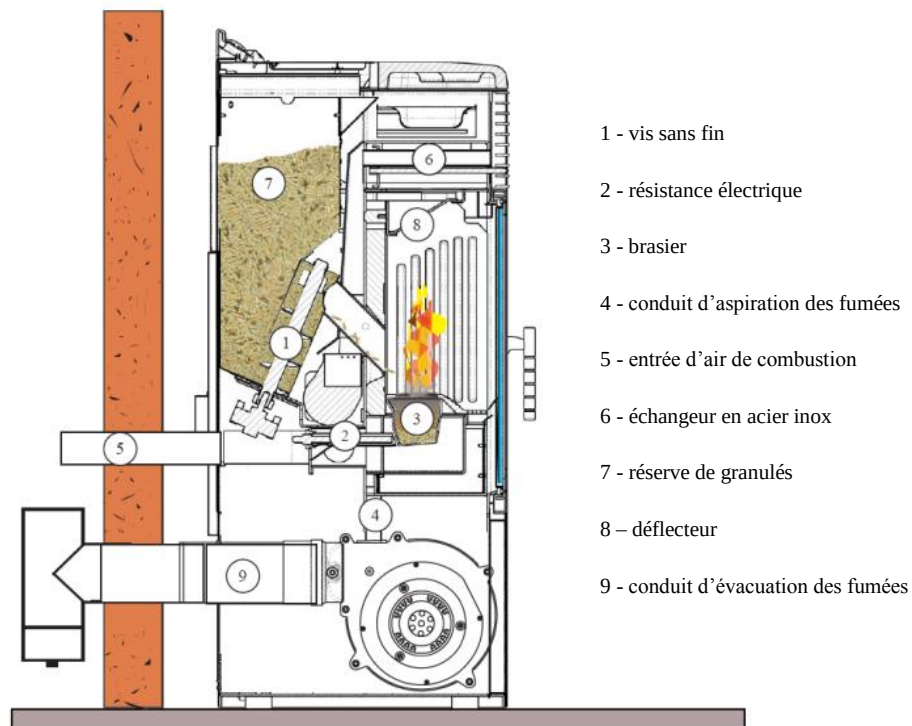


Figure 2.17 : Vue du fonctionnement du poêle à granulés LISA

Mode d'utilisation du poêle lors des essais

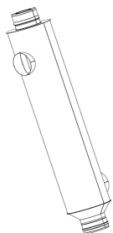
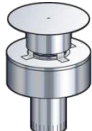
Dans notre étude, chaque essai est lancé et arrêté manuellement par l'opérateur. Aucune température de consigne n'est fixée. Le poêle fonctionne selon le couple pellet/fumée qui correspond à la puissance choisie jusqu'à la mise en arrêt de l'appareil par l'utilisateur.

Les granulés de bois (ou pellets) utilisés lors de nos essais sont de marque CRÉPITO. Fabriqué grâce au compactage de sciures de résineux, ce combustible possède un PCI d'environ 19 000 kJ/kg, c'est-à-dire environ 5,3 kWh/kg, et une humidité moyenne comprise entre 8% et 10%.

➤ Le conduit de cheminée

Le conduit de cheminée se décompose en une série d'éléments représentés dans le Tableau 2.7 comprenant dans l'ordre et de bas en haut un té de raccordement, un élément droit de prise d'air (EDPA), deux éléments droits de 250 mm (ED250) dont l'un possède des prises de mesure, un conduit échangeur, à nouveau un élément de prise de mesure, un ED250, encore élément de prise de mesure mais de 150 mm, puis deux éléments droits d'1 m (ED1000) avant le terminal en toiture. Par ailleurs, un élément droit de conduit horizontal de 250 mm permet de relier la buse de sortie des fumées de l'appareil de chauffage jusqu'au té de raccordement. Finalement, la hauteur utile totale du conduit de cheminée est la même lors des deux phases d'essais et s'établit à 4970 mm, soit près de 5 m.

Tableau 2.7 : Vue des différents éléments de conduit concentrique utilisés lors des essais

Té	EDPA	ED250	Conduit Échangeur	ED1000	Terminal
					
175 mm	150 mm	250 mm	1245 mm	1000 mm	250 mm

➤ Isolation du conduit échangeur et ventilateurs de soufflage

Le conduit échangeur et les éléments de prise de mesure sont contenus dans un caisson d'isolation rempli de laine minérale isolante en vrac. Les différentes parois du caisson sont également isolées sur leur face intérieure par une plaque de laine minérale recouverte d'une feuille d'aluminium. Une plaque isolante/réfléchissante de ce type est également placée sur la face extérieure du caisson située immédiatement derrière le poêle. Les éléments de conduit qui se situent dans l'espace de raccordement entre la base du caisson et l'arrière du poêle sont également calorifugés.

Deux ventilateurs EXTRA 500 sont montés en série en amont du caisson d'isolation contenant le conduit échangeur. Cette association représentée sur la Figure 2.18 permet d'atteindre un débit volumique maximum de plus de 350 m³/h dans le circuit de l'air de ventilation. Lors des essais, les différentes valeurs du débit d'air de ventilation sont obtenues en utilisant un variateur de tension et/ou par l'introduction volontaire de pertes de charge supplémentaires en entrée et en sortie du dispositif.



Figure 2.18 : Vues de l'isolation du conduit échangeur et de l'association en série des ventilateurs

2.2.3. Métrologie et instrumentation

Les différentes mesures sont réalisées sur les trois fluides gazeux que sont les fumées de combustion, l'air de ventilation et l'air de combustion. Les principales contraintes de mesure sont imposées par les hautes températures et les faibles vitesses des fumées, ainsi que par le fait que l'air de combustion circule dans un espace annulaire.

➤ Mesure de la vitesse

On souhaite mesurer, en régime permanent, le débit massique moyen des fumées, de l'air de combustion et de l'air de ventilation. Il est obtenu grâce à la mesure de la vitesse dans la section de l'écoulement et grâce à la connaissance de la température moyenne au lieu de la mesure.

- Capteur de vitesse à moulinet HÖNTZSCH

On dispose de deux sondes de vitesse à moulinet HÖNTZSCH, l'une en acier inox et l'autre en aluminium, équipées chacune d'un transmetteur configurable disposant d'un affichage et d'une sortie analogique. Une vue de ces différents éléments est donnée sur la Figure 2.19.



Sonde en aluminium

Sonde en acier inox

Transmetteur

Figure 2.19 : Vue des capteurs de vitesse à moulinet HÖNTZSCH

Le capteur en acier inox peut résister à de hautes températures et détecter des vitesses relativement faibles sur un fluide gazeux chargé de particules solides. En effet, les vitesses et les températures moyennes des fumées se situent respectivement autour de 1,5 m/s et de 250°C dans le conduit d'un poêle à granulés, et autour de 1 m/s et de 500°C dans celui d'un insert à bûches. Le capteur en aluminium résiste à de moins hautes températures, mais il permet de mesurer des vitesses légèrement plus faibles, comme précisé dans le Tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Caractéristiques techniques des capteurs de vitesse à moulinet HÖNTZSCH

Caractéristiques	Unités	Sonde en aluminium	Sonde en acier inox
Température d'utilisation	[°C]	-20 à +140	-20 à +500
Diamètre / Longueur	[mm]	25 / 170	25 / 170
Plage de mesure	[m/s]	0,3 à 20	0,4 à 20
Précision	jusqu'à 10 m/s	± 0,15	± 0,15
	de 10 à 20 m/s	± 0,30	± 0,30

Les capteurs de vitesse à moulinet mesurent une vitesse de rotation directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement du fluide dans lequel ils sont immergés. Placés au centre de la veine d'écoulement, les capteurs mesurent la fréquence des impulsions électriques émises lors du passage des pâles du moulinet devant un détecteur. Au niveau du transmetteur, cette fréquence est reliée via une loi proportionnelle à la vitesse de rotation du moulinet, puis à la valeur de la vitesse locale du fluide d'étude. Le signal est alors affiché et disponible en sortie analogique 0-10 V pour une acquisition continue. La constante de temps, fixée pour l'affichage de la valeur mesurée, affecte également la valeur instantanée du signal à la sortie analogique. Elle est réglable entre 1 s et 20 s.

Dans les conduites de faible diamètre, l'introduction d'un facteur de profil donné par le constructeur permet d'obtenir la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section. En effet, pour calculer la vitesse moyenne v_{moy} de l'écoulement, la vitesse locale v_{loc} mesurée par la sonde au centre de la veine doit être corrigée au niveau du transmetteur en la multipliant par un coefficient appelé facteur de profil et noté F_p . Dans le cas de conduites circulaires de diamètre supérieur à 250 mm et dans les conditions de mesure où le capteur est centré dans la section droite de la veine, que l'écoulement considéré est irrotationnel et que son profil est développé, soit environ 20 diamètres en amont et 10 diamètres en aval, le constructeur admet que la vitesse moyenne correspond à la vitesse locale mesurée et préconise ainsi d'utiliser $F_p = 1$. Dans le cas où l'on souhaite déterminer la vitesse moyenne de l'écoulement avec des sondes à moulinet de diamètre 25 mm dans des conduites circulaires de diamètres D inférieurs et dans les mêmes conditions de mesure, le constructeur préconise l'utilisation des coefficients de correction donnés dans le Tableau 2.9.

Tableau 2.9 : Facteurs de profil des capteurs de vitesse à moulinet ZS25 HÖNTZSCH

D	[mm]	50	60	70	80	90	100	120	150	180	220
F_p	[-]	0,735	0,760	0,789	0,807	0,829	0,849	0,882	0,923	0,945	0,955

- Transmetteur de vitesse à fil chaud et à boule chaude TSI

On dispose également de deux transmetteurs de vitesse TSI. L'un est équipé d'une sonde à boule chaude et l'autre d'une sonde à fil chaud (Figure 2.20). Dans les deux cas, l'élément sensible du capteur thermique est chauffé en continu à une température supérieure à la température ambiante. L'écoulement a ensuite tendance à le refroidir. La vitesse de l'écoulement est alors reliée à l'intensité du courant que le circuit de régulation doit fournir pour maintenir constante la température de l'élément sensible. Ces capteurs sont configurables sur site, tant sur la nature du signal en sortie analogique que sur l'étendue de la plage de mesure ou encore sur la valeur de la constante de temps, sélectionnable entre 0,05 et 10 s. Pour les deux modèles, le diamètre de la sonde vaut 6,4 mm.

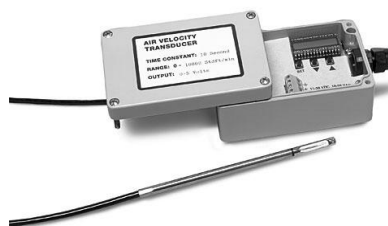


Figure 2.20 : Vue du transmetteur de vitesse à fil chaud TSI

La vitesse mesurée est rapportée aux conditions normales de pression et de température, soient 1014 Pa et 21,1°C pour le constructeur. Le Tableau 2.10 donne les principales caractéristiques des deux capteurs, dont la plage de température de compensation s'étend de 0°C à 60°C.

Tableau 2.10 : Caractéristiques techniques des transmetteurs de vitesse TSI

Caractéristiques	Unités	Boule chaude	Fil chaud
Longueur de l'élément sensible	[mm]	3,2	3,4
Plage de mesure	[m/s]	0,05 à 2,5	0,125 à 50,0
Précision	[m/s]	± 0,5% P.E. ± 3% de v.m.	± 0,5% P.E. ± 2% de v.m.
Temps de réponse	[s]	5	0,2

P.E. : pleine échelle de la plage sélectionnée

v.m. : valeur mesurée

➤ Mesure de la température

On souhaite mesurer en régime permanent, la valeur moyenne de la température des fumées, de l'air de combustion et de l'air de ventilation dans les différentes sections d'entrée et de sortie du conduit échangeur. On dispose pour cela de thermocouples de type K et de 2 sondes platine de 100 Ω.

- Thermocouple de type K

Il existe différents types de thermocouples (E, J, K, S, T...) dont les domaines d'utilisation et les sensibilités varient en fonction de la nature des métaux qui les composent, du diamètre des fils conducteurs et des sollicitations en température qu'ils subissent. De façon générale, les thermocouples possèdent une bonne fiabilité, un faible encombrement et leur mise en œuvre est aisée car ils n'ont besoin que de 2 voies pour être relié à une centrale d'acquisition.

La mesure de la température par un thermocouple est basée sur l'effet Seebeck, qui décrit l'apparition d'une force électromotrice dans un circuit ouvert, composé de deux conducteurs de natures différentes, lorsque leurs jonctions sont portées à des températures différentes. Comme cela est représenté sur la Figure 2.21, un thermocouple est constitué de deux fils conducteurs métalliques homogènes A et B, dont les caractéristiques thermoélectriques sont différentes. Ces deux conducteurs sont reliés entre eux à la température T_1 au niveau de la jonction de mesure (soudure chaude) et à la température T_2 au niveau de la jonction de référence (soudure froide). Lorsque les deux jonctions sont à des températures différentes, il se crée une force électromotrice qui ne dépend que de la température des jonctions. Le signal est ensuite transmis jusqu'à l'appareil de mesure, dont la température est T_3 , par des connexions de sortie qui sont le plus souvent en cuivre.

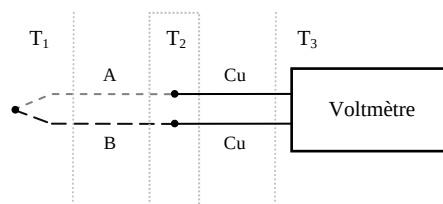


Figure 2.21 : Principe de fonctionnement d'un thermocouple

La mesure de la température avec un thermocouple s'effectue donc de manière indirecte. En effet, le capteur mesure une différence de potentiel qui est l'image de la différence de température entre la soudure chaude et la soudure froide. Pour obtenir la valeur d'une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue. Cette température de référence peut être choisie comme celle de la glace fondante à 0°C, celle de la température ambiante ou encore celle de l'électronique au niveau de la connexion avec le module de traitement (T_3). Une fois la température de référence mesurée, une image réelle de la température de la soudure chaude peut être obtenue.

On dispose d'une trentaine de thermocouples de type K chemisés à isolant minéral avec câble d'extension et fils nus pour un branchement sur une centrale d'acquisition sans fiche de connexion. Leur plage de mesure s'étend de -200°C à +1200°C avec une sensibilité moyenne de l'ordre de 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Les fils conducteurs positif et négatif sont respectivement en Chromel (Ni-Cr : alliage de nickel et de chrome) et en Alumel (Ni-Al : alliage de nickel, de silicium et d'aluminium). Ils sont protégés par une gaine métallique en Inconel 600 et isolés par de l'oxyde de magnésie MgO , une poudre minérale compactée qui protège l'élément sensible. La tenue en température du câble d'extension en téflon blindé s'étend de -50°C à 250°C. Les capteurs ont été choisis avec un diamètre de 2 mm pour répondre aux contraintes de fixation à travers les conduits à double paroi inox, pour limiter la sensibilité du capteur au rayonnement des parois et pour avoir un temps de réponse le plus court possible. Ces capteurs sont de classe de tolérance 1. Ils ont une précision standard à l'achat qui vaut $\pm 1,5^\circ\text{C}$ entre -40°C et +375°C.

- Sonde platine de 100 Ω

Le fonctionnement d'une sonde à résistance de platine est basé sur la variation de la résistivité électrique du platine en fonction de la température. En effet, la résistance du fil de platine augmente de façon proportionnelle avec la valeur de la température mesurée, par rapport à une valeur de référence à 0°C de la résistance. Il existe trois technologies différentes qui utilisent respectivement 2, 3 ou 4 fils pour assurer le montage des sondes à résistance. La technologie de montage à 4 fils donne la meilleure précision de mesure, car il ne circule aucun courant dans les fils relevant la tension. En effet, 2 fils sont dédiés à l'alimentation du capteur et 2 fils permettent la mesure de la tension aux bornes de l'élément de platine, permettant ainsi de s'affranchir de la valeur ohmique des fils reliant le multimètre à l'élément de platine. Un convertisseur transforme ensuite la tension de faible amplitude en un signal en courant 4-20 mA interprétable par la centrale d'acquisition.

On dispose de 2 sondes platine à montage 4 fils. Elles sont chemisées sous tube inox avec 5 m de câble d'extension. Elles sont constituées d'un filament de platine dont la résistivité est de 100 Ω à 0°C. Ce type de capteur est ainsi appelé plus communément sonde Pt100. Les deux sondes ont un diamètre de 2 mm et une longueur de 150 mm. Elles sont de classe de tolérance A. Leur précision standard à l'achat est de $\pm 0,15^\circ\text{C} \pm 0,002 \cdot |T|$ sur une étendue de mesure allant de -200°C à +500°C et leur sensibilité moyenne est de l'ordre de 0,39 Ω/K .

- Étalonnage des capteurs de température

Les différents capteurs de température travaillant sur l'air ont été étalonnés entre 0°C et 120°C dans un bain thermostaté dont la température de consigne peut être fixée entre -20°C et +150°C. La valeur renvoyée par nos capteurs est alors comparée, pour différentes températures du bain, à celle d'un capteur de référence composé d'une sonde standard PRT (Platinum Resistance Thermometer) et d'un afficheur de précision.

Les thermocouples de type K destinés aux mesures sur les fumées de combustion ont été étalonnés de la même façon, mais jusqu'à 250°C dans un bain de sable. Dans ce deuxième dispositif, les capteurs ont été positionnés dans un insert métallique rempli d'une huile thermique pour assurer une parfaite conduction de la chaleur dans la zone de mesure. La Figure 2.22 donne une vue du matériel utilisé pour étalonner les capteurs.

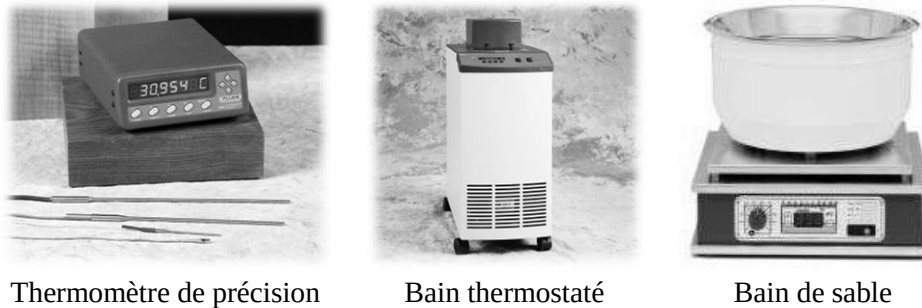


Figure 2.22 : Vue du matériel utilisé pour l'étalonnage des capteurs de température

Après la phase d'étalonnage et compte tenu des caractéristiques du thermomètre de précision, les capteurs de température possèdent une précision de $\pm 0,06^{\circ}\text{C}$, à l'exception des 12 thermocouples qui travaillent sur les fumées dont l'incertitude de mesure vaut $\pm 0,20^{\circ}\text{C}$. Un exemple détaillé des résultats obtenus lors de l'étalonnage d'un thermocouple travaillant sur les fumées et d'un autre travaillant sur l'air ainsi que d'une sonde platine est donné en Annexe 1.

➤ Acquisition des données

On dispose d'une centrale d'acquisition CR1000 CAMPBELL SCIENTIFIC et du logiciel associé LoggerNet. La centrale est constituée d'un transformateur, d'une batterie, d'un module principal et de deux multiplexeurs à relais, comme représenté par la Figure 2.23. L'ensemble est disposé dans un caisson de protection. Chaque multiplexeur possède 32 voies d'entrées différentielles analogiques, ce qui augmente significativement le nombre de signaux pouvant être mesurés par la centrale. Le logiciel LoggerNet permet de programmer la centrale, mais aussi de visualiser et de récupérer sur un ordinateur les différentes données enregistrées.



Figure 2.23 : Vue du module principal de la centrale CR1000 et d'un multiplexeur

➤ Analyse de la combustion

On dispose d'un analyseur de combustion portable TESTO 330-2 dont une vue est donnée par la Figure 2.24. Cet appareil permet de mesurer le taux moyen de dioxygène $\sigma(\text{O}_2)$ en % et de monoxyde de carbone $\sigma(\text{CO})$ en ppm au niveau de la buse de sortie des fumées à l'arrière du poêle.

Les formules de calcul entrées dans l'analyseur de combustion par le constructeur permettent d'évaluer le taux moyen de dioxyde de carbone $\sigma(\text{CO}_2)$ et l'excès d'air λ_{EA} à partir de la seule mesure du taux moyen de dioxygène $\sigma(\text{O}_2)$, suivant les expressions :



$$\sigma(\text{CO}_2) = \frac{\sigma(\text{CO}_{2,\text{max}}) (0,21 - \sigma(\text{O}_2))}{0,21} \quad (2.29)$$

$$\lambda_{\text{EA}} = \frac{\sigma(\text{CO}_{2,\text{max}})}{\sigma(\text{CO}_2)} \quad (2.30)$$

Figure 2.24 : Vue de l'analyseur de combustion portable TESTO 330-2

avec $\sigma(\text{CO}_{2,\text{max}}) = 20,31\%$ pour le bois/coke

L'acquisition continue et l'exploitation des mesures s'effectuent avec le logiciel Easy Testo 330. Les principales caractéristiques de l'analyseur de combustion sont données par le Tableau 2.11.

Tableau 2.11 : Caractéristiques techniques de l'analyseur de combustion portable TESTO 330-2

Grandeur mesurée	Notation	Unité	Plage de mesure	Précision
Température	T	[°C]	-40 à +1200	$\pm 0,5^\circ\text{C}$ de 0 à 100°C $\pm 0,5\%$ de v.m. jusqu'à $1\,200^\circ\text{C}$
Monoxyde de carbone	$\sigma(\text{CO})$	[ppm]	0 à 4 000	± 20 jusqu'à 400 ppm $\pm 5\%$ de v.m. jusqu'à 1000 ppm
Dioxyde de carbone	$\sigma(\text{CO}_2)$	[%]	0 à 50	$\pm 0,2\%$ de v.m.
Dioxygène	$\sigma(\text{O}_2)$	[%]	0 à 21	$\pm 0,2\%$ de v.m.

v.m. : valeur mesurée

➤ Instrumentation du banc

Sur l'air de ventilation, les différents capteurs sont directement mis en place au niveau des conduites. Sur les fumées et sur l'air de combustion, les capteurs sont placés dans des éléments de prise de mesure (EDPM) situés au dessus et au dessous du conduit échangeur.

- Températures

Les températures des fumées sont relevées à l'aide des thermocouples de type K étalonnés jusqu'à 250°C , tandis que les autres thermocouples sont utilisés sur l'air de ventilation et sur l'air de combustion. Les sondes Pt100 mesurent la température à l'intérieur des deux multiplexeurs où sont raccordés les thermocouples pour connaître avec plus de précision la température de la soudure froide des thermocouples. En effet, cette mesure est réalisée sinon par défaut avec une thermistance située sous le bornier principal de la centrale CR1000 et dont la précision vaut $\pm 0,3^\circ\text{C}$ entre -25 et $+50^\circ\text{C}$.

La Figure 2.25 présente le positionnement des thermocouples dans les différentes veines d'écoulement. Une seule prise de mesure est réalisée sur les fumées car elle nécessite la mise en place d'un guide de sonde qui traverse l'espace annulaire, perturbe l'écoulement de l'air de combustion et introduit un pont thermique entre les deux conduits en se comportant comme une ailette.

Sur l'air de combustion et sur l'air de ventilation, la température moyenne relevée est issue de la mesure de la température en 3 points différents de la section de passage de l'écoulement. Un quatrième et dernier capteur était initialement prévu dans l'espace annulaire de passage de l'air de combustion, mais celui-ci était soumis au rayonnement du guide de sonde des fumées. La température mesurée était alors systématiquement supérieure aux 3 autres.

Sur l'air de ventilation, le fait d'avoir trois points de mesure par section a permis d'identifier les distances auxquelles il fallait placer les capteurs avant et après le conduit échangeur. En effet, les mesures ne doivent pas être effectuées trop près de l'entrée et de la sortie du conduit échangeur car l'écoulement y est perturbé. Les capteurs sont ainsi légèrement décalés dans la conduite isolée où la distribution de température dans la section de l'écoulement est plus homogène. En résumé :

- Sur les fumées, la mesure a lieu en 1 point au centre du conduit d'évacuation de diamètre D ;
- Sur l'air de combustion, la mesure est effectuée en 3 points de la section droite. Les capteurs sont décalés de 90° et sont placés au centre de l'espacement annulaire, noté e_a ;
- Sur l'air de ventilation, la mesure est effectuée en 3 points de la section droite. Les capteurs sont décalés de 120° et placés au tiers du diamètre de la veine D .

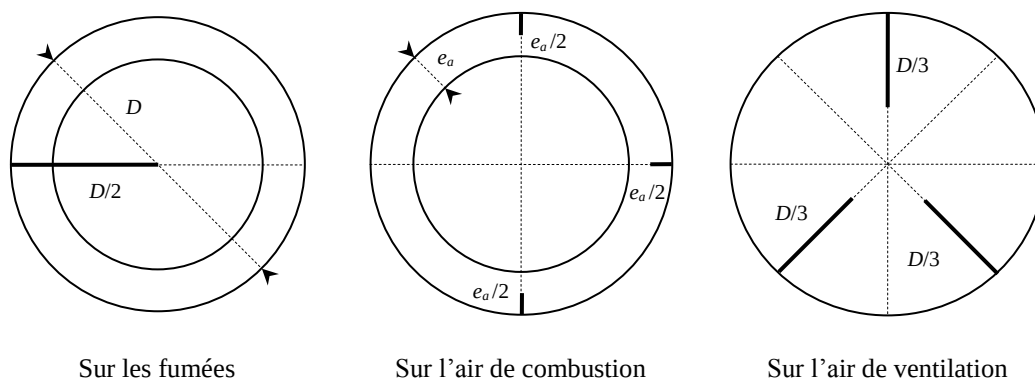


Figure 2.25 : Positionnement des thermocouples dans les sections de passage des 3 fluides

• Vitesses

Les vitesses des fumées et de l'air de ventilation sont respectivement mesurées dans des conduites de diamètre 80 mm et 130 mm, avec les capteurs à moulinet HÖNTZSCH en acier inox et en aluminium. Les valeurs des facteurs de profil introduits dans chaque transmetteur pour connaître la vitesse moyenne de l'écoulement sont de 0,807 sur les fumées et de 0,893 sur l'air de ventilation. Le transmetteur à boule chaude s'avérant défectueux, la vitesse de l'air de combustion est obtenue avec le transmetteur à fil chaud TSI dont la pleine échelle est prise entre 0,125 m/s et 3,5 m/s. Les différentes sondes de vitesse sont placées de telle sorte qu'il y a environ 20 diamètres de longueur droite de conduite sans dévoiement en amont de la mesure et environ 10 diamètres en aval.

En outre, la mesure sur l'air de combustion doit être adaptée au fait qu'il puisse être prélevé soit dans l'ambiance, soit directement à l'extérieur en raccordant le poêle à l'élément de prise d'air situé à la base du conduit concentrique de cheminée. Les mesures sur l'air de combustion sont ainsi effectuées dans une conduite rigide de diamètre intérieur de 45 mm, intégrant une prise de température et une prise de vitesse avec le capteur à fil chaud.

La constante de temps des différents transmetteurs de vitesse est fixée à 10 secondes. Les capteurs à moulinet effectuent une mesure instantanée à chaque seconde. Le capteur à fil chaud mesure 20 valeurs instantanées pendant la durée fixée par la constante de temps, soit une mesure toutes les demi-secondes. La vitesse finalement transmise par les différents transmetteurs correspond à la moyenne des mesures prises au cours de la période définie par la constante de temps.

- Analyse de la combustion

La canne de prélèvement de l'analyseur de combustion est placée dans le conduit de raccordement immédiatement derrière la buse de sortie des fumées. Une fois le régime établi, seules les valeurs moyennes sur une durée de 30 min du taux de CO et de CO₂ sont retenues pour déterminer les caractéristiques thermophysiques des fumées.

➤ Vue du banc d'essai instrumenté

La Figure 2.26 donne une vue du premier banc expérimental réalisé dans les locaux du Centre d'Essais et de Recherche des Industries de la Cheminée (CERIC) à St Symphorien pour effectuer la caractérisation thermique des prototypes de conduit échangeur dédiés aux poêles à granulés.



Figure 2.26 : Vue du banc de caractérisation thermique des prototypes de conduit échangeur

Il convient de noter la présence d'un ventilateur supplémentaire au pied de l'installation. En effet, il s'est avéré nécessaire de forcer la descente de l'air de combustion normalement prélevé par le poêle dans l'espace annulaire de la cheminée concentrique. Des explications détaillées sont données dans la partie suivante qui expose les problématiques rencontrées dès les premiers essais.

2.2.4. Problématiques rencontrées

➤ Non étanchéité du poêle

Lors des premiers essais réalisés sur les prototypes de conduit échangeur et lorsque le poêle est raccordé à la cheminée concentrique, la vitesse de l'air de combustion mesurée au niveau de la prise arrière du poêle est très faible et décroît régulièrement au cours de l'essai, jusqu'à atteindre le seuil minimum de mesure de la sonde. Ce phénomène est illustré sur le graphique de la Figure 2.27, qui donne l'évolution du débit massique des fumées de combustion $q_{m, FC}$ mesuré dans l'espace central du conduit d'évacuation et celui du débit massique de l'air de combustion $q_{m, AC}$ mesuré au niveau de la prise arrière du poêle LISA raccordé.

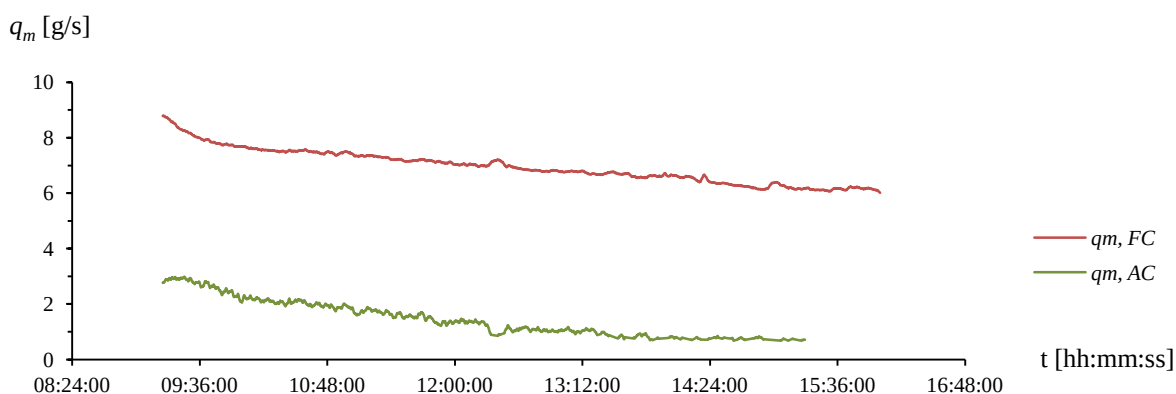


Figure 2.27 : Évolution du débit massique des fumées et de l'air de combustion (LISA raccordé)

Lors des essais suivants, le fonctionnement du poêle à granulés est étudié plus en détail. Le conduit échangeur est alors remplacé par un élément concentrique standard de manière à s'affranchir de toute influence supplémentaire sur l'admission d'air de combustion. Celui-ci est donc prélevé soit dans l'ambiance, soit à l'extérieur via un conduit concentrique de cheminée tout à fait standard. Le fonctionnement est étudié pour les 3 principaux régimes de l'appareil, qui sont identifiés par les appellations P1-V1, P3-V3 et P5-V5.

Le Tableau 2.12 donne les valeurs du rapport du débit massique d'air de combustion admis au niveau de la prise arrière du poêle sur le débit massique des fumées évacuées, en fonction du lieu où est prélevé l'air de combustion et du régime de fonctionnement de l'appareil.

Tableau 2.12 : Valeurs expérimentales du rapport $q_{m, AC} / q_{m, FC}$ en fonction du lieu de la prise d'air (LISA)

Lieu de la prise d'air	Unités	P1-V1	P3-V3	P5-V5
ambiance	[%]	25,9	23,7	22,4
conduit concentrique	[%]	5,0	4,1	2,5

Il apparaît que le rapport $q_{m, AC} / q_{m, FC}$ s'établit entre 20% et 25% quand l'air de combustion est prélevé dans l'ambiance, tandis qu'il est seulement compris entre 2,5% et 5% lorsque le poêle est raccordé au conduit concentrique. En outre, plus le régime de fonctionnement de l'appareil est élevé, plus l'admission d'air de combustion au niveau de la buse est faible.

La consommation de granulés, notée $q_{m,g}$ et exprimée en kg/h, est également mesurée lors de ces essais. À partir de la mesure du débit massique des fumées $q_{m,FC}$ et en considérant que la quantité d'imbrulés $q_{m,imb}$ représente 2% de la consommation totale en granulés, la valeur théorique du débit massique d'air de combustion $q_{m,AC}$ réellement utilisé par le poêle est donnée par l'expression :

$$q_{m,FC} + q_{m,imb} = q_{m,g} + q_{m,AC} \quad (2.31)$$

Quelle que soit la manière dont est prélevé l'air de combustion, le Tableau 2.13 présente les valeurs théoriques du rapport $q_{m,AC} / q_{m,FC}$ qui devraient être retrouvées expérimentalement pour les différents régimes de fonctionnement du poêle.

Tableau 2.13 : Valeurs théoriques du rapport $q_{m,AC} / q_{m,FC}$ en fonction du régime du poêle (LISA)

	Unités	P1-V1	P3-V3	P5-V5
$q_{m,FC}$	[kg/h]	21,60	21,24	20,52
$q_{m,g}$	[kg/h]	0,8	0,9	1,0
$q_{m,imb}$	[kg/h]	0,016	0,018	0,020
$q_{m,AC}$	[kg/h]	20,82	20,36	19,54
$q_{m,AC} / q_{m,FC}$	[%]	96,4	95,8	95,2

De façon évidente, il apparaît que le poêle à granulés LISA ne prélève qu'une très faible partie de l'air de combustion au niveau de la buse d'admission située à l'arrière de l'appareil. En effet, quel que soit le lieu de la prise d'air de combustion, les valeurs du rapport $q_{m,AC} / q_{m,FC}$ devraient s'établir à plus de 95%, une valeur largement supérieure à celles mesurées et présentées dans le Tableau 2.12.

L'appareil prélève donc une grande partie de l'air de combustion dont il a besoin par des entrées d'air non contrôlées. Il n'est pas étanche. En pratique, cela n'entrave pas le fonctionnement du poêle, mais l'intérêt de son raccordement à un conduit étanche devient très limité : en effet, l'air de combustion n'y est presque pas prélevé !

Dans le cadre de notre application, cette problématique se révèle être importante, car il est prévu que le poêle soit alimenté de manière étanche pour éviter tout risque de perturbation du système de ventilation dans les habitations de type BBC et une partie de la caractérisation des prototypes de conduit échangeur porte sur les transferts thermiques du côté de l'air de combustion.

Pour tenter de résoudre les problèmes d'inétanchéité du poêle LISA, une étude est réalisée dans le but d'identifier les entrées d'air non contrôlées : une machine à fumée est placée au niveau de la prise d'air de combustion à l'arrière du poêle et la buse de sortie des fumées de combustion est volontairement obstruée. La fumée introduite par la machine s'échappe alors à travers les différents points d'inétanchéité de l'appareil, que l'on s'attache à corriger au fur et à mesure. Toutefois, après traitement, le poêle n'est plus en état de fonctionner. En effet, l'entrée d'air située au niveau de la résistance électrique ne peut pas être obstruée sans compromettre l'allumage du poêle. De plus, le calfeutrage réalisé autour du ventilateur d'extraction des fumées ne permet plus son refroidissement et entraîne l'arrêt automatique de l'appareil. Finalement, les prochains essais sont réalisés en conservant la configuration initiale du poêle à granulés. L'appareil n'est donc pas étanche et l'air de combustion est majoritairement prélevé dans l'ambiance.

Pour caractériser le conduit échangeur à triple paroi, il est décidé de forcer le passage de la quantité d'air de combustion nécessaire au bon fonctionnement du poêle dans le conduit de cheminée concentrique. La valeur du débit volumique $q_{v, AC}$ à imposer dans le conduit étanche est déterminée à partir du volume massique d'air primaire $L_{\min}$ nécessaire à la combustion stœchiométrique du bois, ainsi qu'à partir des valeurs d'excès d'air λ_{EA} et de consommation de granulés $q_{m, g}$ mesurées pour chacune des 3 puissances de fonctionnement du poêle.

$$q_{v, AC} = \lambda_{EA} q_{m, g} L_{\min} \quad (2.32)$$

avec $L_{\min} = 5 \text{ m}^3/\text{kg}$ pour le bois

Le Tableau 2.14 montre que les différentes valeurs ainsi obtenues pour le débit volumique d'air de combustion à imposer sont relativement constantes. Ainsi, dans la phase 2 du protocole d'essai et quelle que soit la puissance du poêle, un débit d'air de combustion de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ environ est imposé dans l'espace annulaire de la cheminée concentrique grâce à un ventilateur supplémentaire situé au pied de l'installation et aspirant de l'air depuis l'extérieur jusque dans l'ambiance.

Tableau 2.14 : Détermination du débit volumique d'air de combustion à simuler dans le conduit étanche

Grandeurs	Unités	P1-V1	P3-V3	P5-V5
λ_{EA}	[-]	5,0	4,5	4,0
$q_{m, g}$	[kg/h]	0,8	0,9	1,0
$q_{v, AC}$	[m ³ /h]	20	20,25	20

➤ Température élevée d'entrée d'air de ventilation

Initialement, l'air de ventilation qui circule dans le système est prélevé à l'extérieur, mais compte tenu de la période de l'année où se déroulent une partie des essais (juin) et dans le but de s'affranchir des variations extérieures, un système de production d'air frais est installé. Il s'agit d'un climatiseur mobile d'une puissance frigorifique de 2750 W et fournissant un débit d'air maximum de $250 \text{ m}^3/\text{h}$. Il est placé dans un caisson équipé d'une bouche d'évacuation d'air chaud donnant sur l'extérieur et d'une bouche de sortie d'air frais reliée à l'entrée de l'installation expérimentale, comme représenté sur la Figure 2.28. La sonde de température ambiante du climatiseur, située initialement au niveau de l'évaporateur, est placée au niveau de la sortie d'air chaud. Le système n'atteint alors jamais la température de consigne, ce qui permet d'avoir un fonctionnement continu de l'appareil. De manière générale, la température de l'air frais en entrée du système se stabilise autour de 18°C .



Figure 2.28 : Vue du climatiseur mobile monobloc et de son caisson d'installation

2.3. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES PROTOTYPES

Lors des essais, les différentes grandeurs sont mesurées pour 3 régimes de fonctionnement du poêle à granulés et pour 5 valeurs du débit d'air de ventilation. Les différents régimes correspondent aux puissances minimum P1-V1, intermédiaire P3-V3 et maximum P5-V5 de l'appareil. Les débits d'air de ventilation utilisés sont fixés à 45, 90, 120, 180 et 250 m³/h. Ces valeurs sont représentatives des obligations réglementaires qui garantissent le renouvellement et la qualité de l'air intérieur dans l'habitat individuel, conformément à l'arrêté du 24 mars 1982.

Dans cette partie, les résultats des essais effectués sur le conduit échangeur à double paroi parfaitement isolé (CEDP-PI) et sur le conduit échangeur à triple paroi parfaitement isolé (CETP-PI) sont présentés uniquement pour les régimes de fonctionnement minimum P1-V1 et maximum P5-V5 de l'appareil. Par ailleurs, les résultats obtenus pour un débit d'air de ventilation de 45 m³/h ne sont pas conservés car l'incertitude de mesure sur la vitesse de l'air y est trop importante. En revanche, les résultats obtenus en imposant un débit d'air de ventilation maximum dans le système, soit environ 350 m³/h, sont présentés, car ils permettent de s'approcher de l'efficacité maximale de l'échangeur.

Dans la première phase de l'étude, les puissances échangées et l'efficacité du CEDP-PI sont déterminées à partir des mesures sur les fumées et sur l'air de ventilation. La caractéristique globale de l'échange du côté des fumées est ensuite évaluée par les méthodes NUT et DTLM. Dans la seconde phase, les puissances échangées et l'efficacité du CETP-PI sont déterminées à partir des mesures sur les fumées, sur l'air de ventilation et sur l'air de combustion.

Comme détaillé dans la partie 2.2.4, l'air de combustion est à chaque fois directement prélevé dans l'ambiance. Toutefois, dans la deuxième phase du protocole qui vise l'étude du CETP-PI, un débit d'air de 20 m³/h est imposé dans l'espace annulaire du conduit de cheminée, de manière à tenir compte des échanges entre l'air de ventilation et l'air de combustion dans le conduit échangeur.

Les différentes valeurs de vitesse et de température sont enregistrées toutes les 10 secondes au niveau de la centrale d'acquisition. Les mesures utilisées dans les bilans sont effectuées en régime permanent. On suit donc la dynamique de la source de chaleur ainsi que celle du système global. On suppose que le régime permanent est atteint lorsque les moyennes glissantes sur 2 minutes des différentes grandeurs mesurées restent constantes pendant 10 minutes. De manière générale, il est atteint 2 heures après l'allumage du poêle. Les principales opérations de calcul menées lors du traitement des données sont précisées ci-dessous :

- Correction de soudure froide et étalonnage des valeurs de température.
- Moyenne des températures prises dans une même section.
- Moyenne glissante sur une durée de 2 minutes des valeurs de température et de vitesse.
- Identification de l'établissement du régime permanent pour les différents fluides.
- Moyenne sur une durée de 10 minutes des valeurs en régime permanent.
- Calcul des puissances échangées, de l'efficacité et de la caractéristique globale de l'échange
- Calcul des incertitudes et de leur poids dans l'incertitude globale des résultats
- Collecte et présentation des données sous formes de tableaux
- Présentation des résultats sous forme de graphiques : $T=f(t)$; $v=f(t)$; $E=f(z)$; $UA=f(z)$

2.3.1. Résultats des essais sur le CEDP-PI

➤ Puissances échangées

Les graphiques de la Figure 2.29 présentent à la fois les valeurs des puissances cédées par les fumées $\dot{Q}_{FC}$ et celles récupérées par l'air de ventilation $\dot{Q}_{AV}$ mesurées lors des essais sur le prototype 2 de conduit échangeur à double paroi parfaitement isolé (CEDP-PI), aux régimes de fonctionnement minimum P1-V1 et maximum P5-V5 du poêle à granulés LISA.

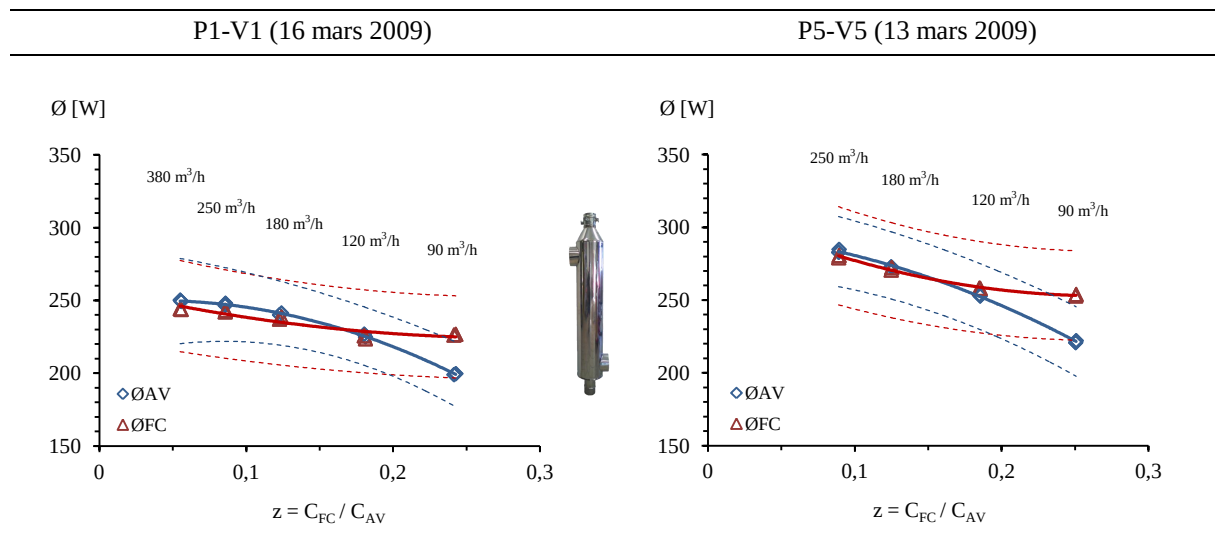


Figure 2.29 : Puissances échangées au sein du conduit échangeur (CEDP-PI)

En abscisse des graphiques, on trouve le rapport de la capacité thermique minimum sur la capacité thermique maximum des 2 fluides considérés. Ce paramètre adimensionnel, noté z , varie dans notre cas entre 0,05 et 0,25 car la capacité thermique des fumées C_{FC} reste relativement constante autour de 7 W/K tandis que celle de l'air de ventilation C_{AV} varie entre 30 W/K et 130 W/K lorsque le débit volumique varie entre 90 m³/h et 380 m³/h.

Il est intéressant de noter que la valeur du point correspondant à la puissance récupérée sur l'air de ventilation pour un débit volumique de 90 m³/h ($z = 0,25$) est à chaque fois très inférieure à celle de la puissance cédée par les fumées. Cet écart s'explique par la moindre précision de la mesure sur la vitesse de l'air de ventilation aux faibles débits et par le fait que la température est également moins homogène en sortie de l'installation aux faibles débits.

Les courbes en traits pointillés délimitent les zones d'incertitude des mesures réalisées. L'incertitude sur la puissance cédée par les fumées est relativement constante et vaut environ $\pm 12\%$, tandis qu'elle varie entre $\pm 8\%$ et $\pm 12\%$ en ce qui concerne la puissance récupérée par l'air de ventilation. Il peut être précisé que l'incertitude liée à la mesure de la vitesse du fluide considéré représente dans chaque cas plus de 70% de l'incertitude totale sur la mesure de la puissance transférée. La méthodologie du calcul de l'incertitude sur les puissances échangées est détaillée en Annexe 2.

De manière générale, on observe que la puissance échangée varie peu suivant le régime de fonctionnement du poêle. Globalement, elle se situe autour de **240 W** à P1-V1 et autour de **270 W** à P5-V5, pour un même débit volumique d'air de ventilation $q_{v, AV} \approx 180 \text{ m}^3/\text{h}$.

Cette faible évolution des puissances échangées suivant les régimes de fonctionnement du poêle à granulés s'explique par le fait que la puissance thermique des fumées à l'entrée du conduit échangeur $\dot{Q}_{FC, in}$ varie peu d'un régime à l'autre. Le graphique de la Figure 2.30 montre en effet qu'elle se situe autour de 1150 W au régime P1-V1 et autour de 1350 W à P5-V5.

On peut également remarquer que la valeur de $\dot{Q}_{FC, in P1}$ est légèrement plus faible pour les valeurs de z inférieures à 0,1 correspondant aux débits d'air de ventilation les plus élevés. Or ces points ont été les premiers effectués au cours de l'essai et l'on peut s'interroger sur le fait que le régime permanent ait bien été atteint pour ces 2 points.

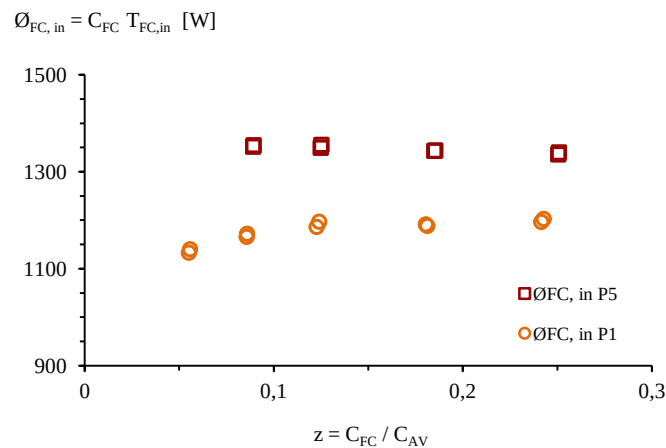


Figure 2.30 : Puissance disponible sur les fumées en entrée du conduit échangeur (CEDP-PI)

➤ Bilan thermique

Le Tableau 2.15 donne ensuite les valeurs représentatives du défaut de bilan $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{moy}$ sur les puissances échangées lors des essais, pour les régimes de fonctionnement P1-V1 et P5-V5 du poêle à granulés, ainsi que pour les différentes valeurs du débit d'air de ventilation. Le défaut de bilan $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{moy}$ correspond au rapport de la différence $\Delta\dot{Q}$ des puissances cédée par les fumées et récupérée par l'air de ventilation sur la moyenne $\dot{Q}_{moy}$ de ces deux puissances échangées.

Tableau 2.15 : Défauts de bilan $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{moy}$ pour les essais à P1-V1 et P5-V5 (CEDP-PI)

$q_{v, AV}$	[m ³ /h]	380	250	180	120	90
P1-V1	$\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{moy}$	2,4	2,0	1,2	0,6	12,8
P5-V5	$\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{moy}$	-	1,5	0,8	2,1	13,6

De manière générale, on observe que les bilans sont corrects sur la plus grande partie des points de mesure, avec $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{moy} < 2,5 \%$ tant que $q_{v, AV} > 120 \text{ m}^3/\text{h}$. En revanche, pour des débits d'air de ventilation plus faibles, le défaut de bilan devient plus important avec $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{moy} > 10 \%$ pour un débit $q_{v, AV} \approx 90 \text{ m}^3/\text{h}$.

On s'attachera par la suite à mieux comprendre l'origine de ces défauts de bilan en comparant les puissances obtenues expérimentalement avec celles pouvant être prédites grâce à une évaluation théorique des échanges basée sur l'utilisation d'un modèle mathématique de conduit échangeur.

➤ Efficacité de l'échange

Les graphiques de la Figure 2.31 présentent l'évolution de l'efficacité de l'échange $E_{\text{CEDP-PI}}$ pour les différents débits d'air de ventilation imposés au sein du CEDP-PI aux régimes de fonctionnement P1-V1 et P5-V5 du poêle à granulés LISA. Les courbes en pointillées délimitent les zones d'incertitude sur l'évaluation de l'efficacité.

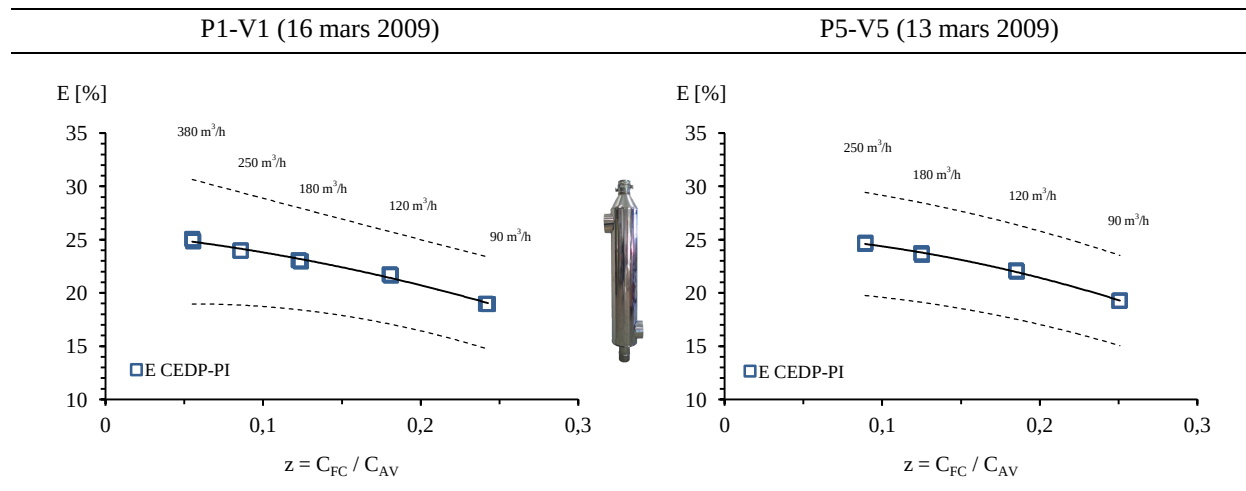


Figure 2.31 : Efficacité de l'échange au sein du conduit échangeur (CEDP-PI)

Compte tenu des faibles écarts observés entre les puissances échangées à P1-V1 et à P5-V5, il s'en suit que l'efficacité de l'échange entre les fumées de combustion et l'air de ventilation ne dépend presque pas du régime de fonctionnement du poêle à granulés et qu'elle est globalement comprise entre **18 et 25%** sur la plage des débits d'air de ventilation étudiés.

Ensuite, on retrouve bien que l'efficacité de l'échange augmente au fur et à mesure que le débit d'air de ventilation imposé dans l'installation s'élève, jusqu'à tendre vers un maximum d'environ 25% lorsque le rapport adimensionnel z tend vers 0. Enfin, l'évolution de l'efficacité de l'échange présente une allure similaire à celle de la puissance récupérée par l'air de ventilation, pondérée par celle de la puissance maximum récupérable qui reste relativement constante sur la plage des débits étudiés, comme le montre le graphique de la Figure 2.32.

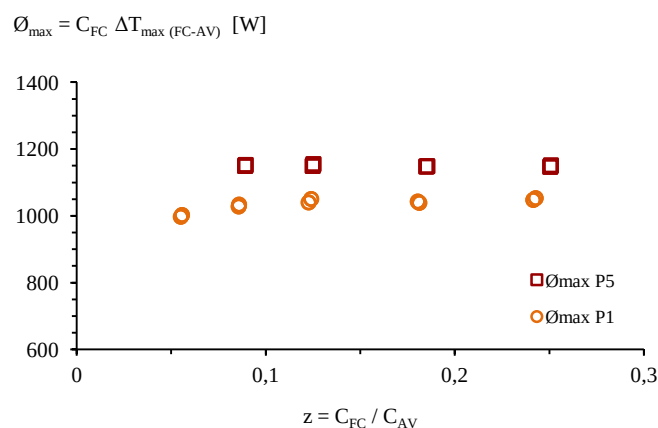


Figure 2.32 : Puissance maximum récupérable au sein du conduit échangeur (CEDP-PI)

➤ Caractéristique globale de l'échange

Les graphiques de la Figure 2.33 présentent les valeurs de la caractéristique globale de l'échange entre les fumées et l'air de ventilation $UA_{FC \rightarrow AV}$. Ces valeurs ont été obtenues en utilisant les différentes méthodes présentées dans le paragraphe 2.2.1.

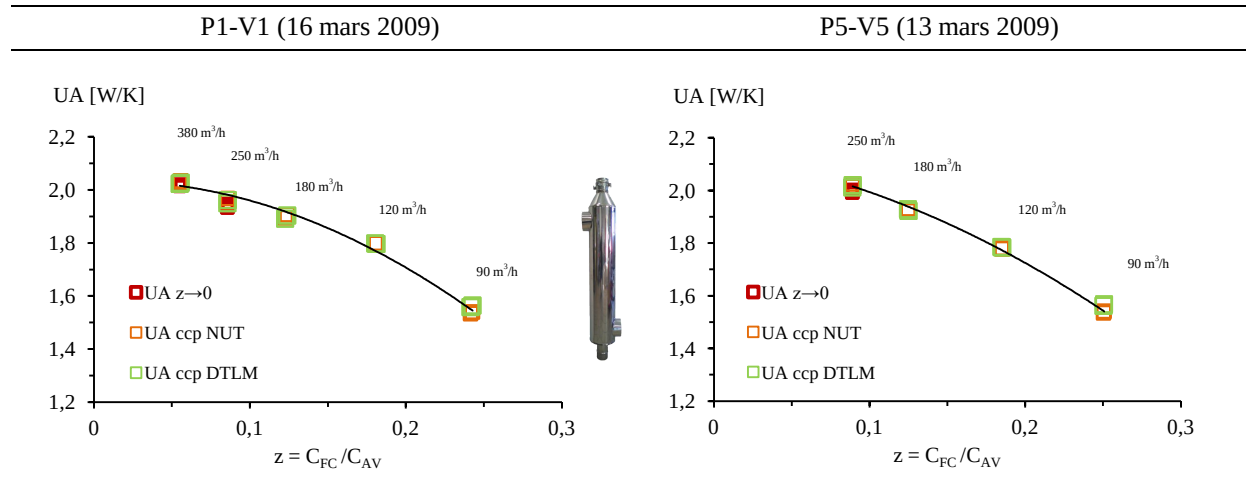


Figure 2.33 : Caractéristique globale de l'échange entre les fumées et l'air de ventilation (CEDP-PI)

De manière générale, sur la plage des débits étudiés, la valeur de la caractéristique globale de l'échange entre les fumées et l'air de ventilation $UA_{FC \rightarrow AV}$ augmente avec le débit d'air de ventilation. Elle est comprise entre **1,5 et 2 W/K**, ce qui est très faible pour un échangeur de chaleur. Toutefois, il existe une bonne concordance des résultats obtenus avec les différentes méthodes basées sur les mesures expérimentales, en particulier pour les débits d'air de ventilation les plus élevés.

Ces faibles valeurs du paramètre $UA_{FC \rightarrow AV}$ permettent d'expliquer les performances réduites de l'échangeur. En effet, malgré la présence d'ailettes, la surface d'échange du côté de l'air de ventilation est **inférieure à 0,9 m²**. En outre, pour des débits d'air de ventilation qui varient entre 90 m³/h et 250 m³/h, une première évaluation théorique des coefficients d'échange convectif montre que les valeurs du côté de la paroi en contact avec les fumées sont situées autour de **6 à 7 W/(m².K)** et qu'elles varient entre **6 et 15 W/(m².K)** du côté de la paroi en contact avec l'air de ventilation.

Suite à l'évaluation théorique des coefficients d'échange convectif, dont le détail sera donné dans la partie 2.4 consacrée au développement du modèle de conduit échangeur, une comparaison est réalisée entre les valeurs calculées et celles évaluées expérimentalement. Le Tableau 2.16 montre ainsi que les écarts relatifs entre la moyenne des valeurs de $UA_{FC \rightarrow AV}$ obtenues expérimentalement et celles obtenues par le calcul restent inférieurs à 8%, quel que soit le débit d'air de ventilation considéré sur notre plage d'étude. Ces différences sont jugées raisonnables et permettent de valider dans un premier temps l'évaluation théorique du coefficient d'échange global de l'échange réalisée dans le modèle.

Tableau 2.16 : Écart relatif entre UA_{exp} et UA_{mod} pour les essais à P1-V1 et P5-V5 (CEDP-PI)

	$q_{v, AV}$	[m³/h]	380	250	180	120	90
P1-V1	$\Delta UA / UA_{exp}$	[%]	1,8	0,6	3,2	5,5	1,0
P5-V5	$\Delta UA / UA_{exp}$	[%]	-	4,2	6,1	7,3	1,7

2.3.2. Résultats des essais sur le CETP-PI

➤ Puissances échangées

Les graphiques de la Figure 2.34 présentent, pour 5 débits de ventilation différents, les valeurs de la puissance cédée $\dot{Q}_{\text{cédée}}$ à la fois par les fumées et par l'air de combustion, ainsi que de la puissance récupérée $\dot{Q}_{\text{récupérée}}$ par l'air de ventilation, lors des essais menés sur le prototype 2 de conduit échangeur à triple paroi parfaitement isolé (CETP-PI), aux régimes de fonctionnement minimum P1-V1 et maximum P5-V5 du poêle à granulés.

Désormais, la chaleur récupérée par l'air de ventilation provient non seulement des échanges qui ont lieu du côté des fumées, mais aussi de ceux qui ont lieu du côté de l'air de combustion. En effet, sur l'ensemble des valeurs mesurées, la température de l'air de combustion au niveau de son entrée dans le conduit échangeur reste toujours supérieure à 50°C, ce qui entraîne bien un échange de chaleur vers l'air de ventilation dont la température ne dépasse pas 30°C lors de ces essais.

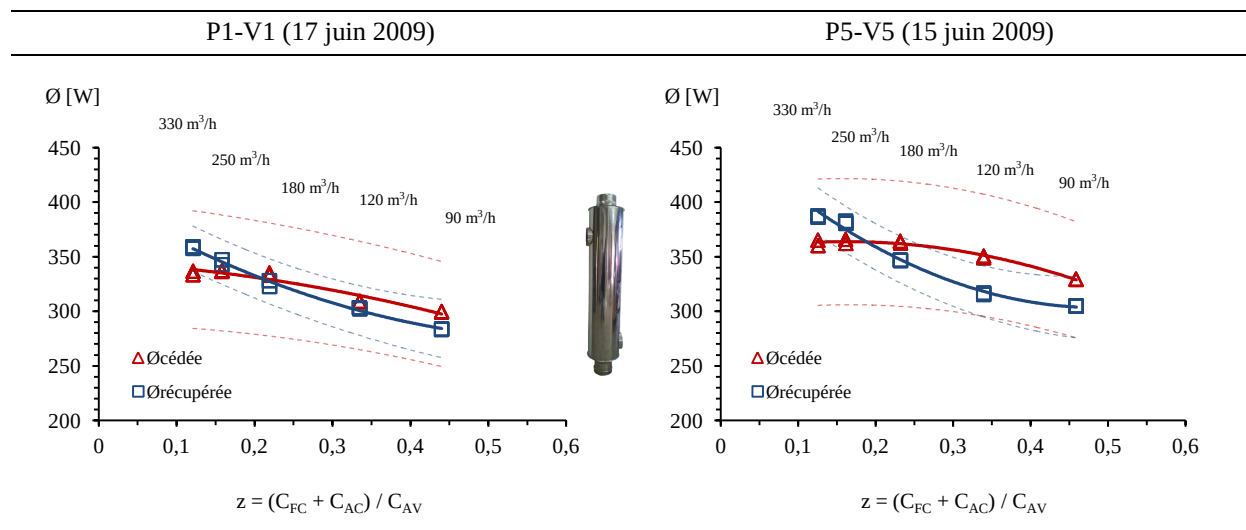


Figure 2.34 : Puissances échangées au sein du conduit échangeur (CETP-PI)

En abscisse des graphiques, on retrouve le paramètre adimensionnel z , qui s'écrit maintenant comme le rapport de la somme des capacités thermiques des fumées et de l'air de combustion, sur la capacité thermique de l'air de ventilation. En effet, on a toujours $C_{FC} + C_{AC} < C_{AV}$ dans nos essais, alors $C_{\min} = C_{FC} + C_{AC}$ et $C_{\max} = C_{AV}$.

Lors des essais sur le CETP-PI, la valeur du paramètre z est comprise entre 0,1 et 0,45. En effet, la valeur de $C_{\min}$ reste relativement constante autour de 13 W/K à P1-V1 et autour de 13,5 W/K à P5-V5, alors que $C_{\max}$ varie entre 30 et 110 W/K lorsque le débit volumique varie entre 90 et 330 m³/h. Par ailleurs, le débit d'air de ventilation maximum est moins important que lors des essais précédents, car des pertes de charge supplémentaires ont été introduites sur le réseau suite au raccordement du caisson d'alimentation en air frais (climatiseur mobile) en amont du conduit échangeur.

De manière générale, on observe ici encore que la puissance échangée varie peu suivant le régime de fonctionnement du poêle. Globalement, elle se situe autour de **325 W** à P1-V1 et autour de **350 W** à P5-V5, pour un même débit volumique d'air de ventilation $q_{v, AV} \approx 180 \text{ m}^3/\text{h}$.

Comme précédemment, les courbes en traits pointillés délimitent les zones d'incertitude des mesures. L'incertitude sur la puissance cédée à la fois par les fumées et par l'air de combustion est relativement constante et vaut environ $\pm 16\%$, tandis qu'elle varie entre $\pm 5,5$ et $\pm 9,5\%$ pour la puissance récupérée par l'air de ventilation, dont l'évaluation aux faibles débits reste délicate. La méthodologie du calcul de l'incertitude sur les puissances échangées est détaillée en Annexe 2.

Une nouvelle fois, l'incertitude liée à la mesure de la vitesse des différents fluides représente la majeure partie de l'incertitude totale sur la mesure de la puissance cédée ou récupérée. On note également des disparités assez fortes, s'élevant parfois à plusieurs degrés de différence, entre les températures d'air de combustion mesurées dans l'espace annulaire à chaque extrémité du CETP-PI. Les valeurs moyennes de température d'air de combustion doivent donc être jugées avec précaution et il paraît nécessaire de multiplier les points de mesure dans ces espaces annulaires.

Un autre fait marquant, mais qui peut toutefois être jugé comme acceptable compte tenu de l'incertitude sur les puissances échangées, est le fait d'avoir parfois une puissance récupérée légèrement supérieure à la puissance cédée, comme c'est systématiquement le cas pour les plus forts débits d'air de ventilation. En outre, dans tous les cas, les variations obtenues sur la puissance récupérée sont davantage marquées que celles obtenues sur la puissance cédée. Cette dernière semble alors être une base plus fiable de prise en compte du niveau moyen des puissances échangées.

Les graphiques de la Figure 2.35 présentent ensuite les puissances thermiques disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion au niveau de leur entrée respective dans le conduit échangeur pour les régimes P1-V1 et P5-V5 du poêle à granulés. Il peut être souligné ici que le paramètre z s'écrit différemment dans les deux cas présentés, suivant que l'on considère uniquement l'échange du côté des fumées ou uniquement celui du côté de l'air de combustion.

Une nouvelle fois, quel que soit le régime étudié, on observe que la puissance disponible sur les fumées ou sur l'air de combustion à l'entrée du conduit échangeur ne varie presque pas. En particulier, le potentiel disponible sur l'air de combustion $\dot{Q}_{AC, in}$ est quasi-constant et s'établit autour de 320 W. Ensuite et comme précédemment, la puissance disponible sur les fumées $\dot{Q}_{FC, in}$ vaut environ 1150 W au régime P1-V1 et 1350 W à P5-V5.

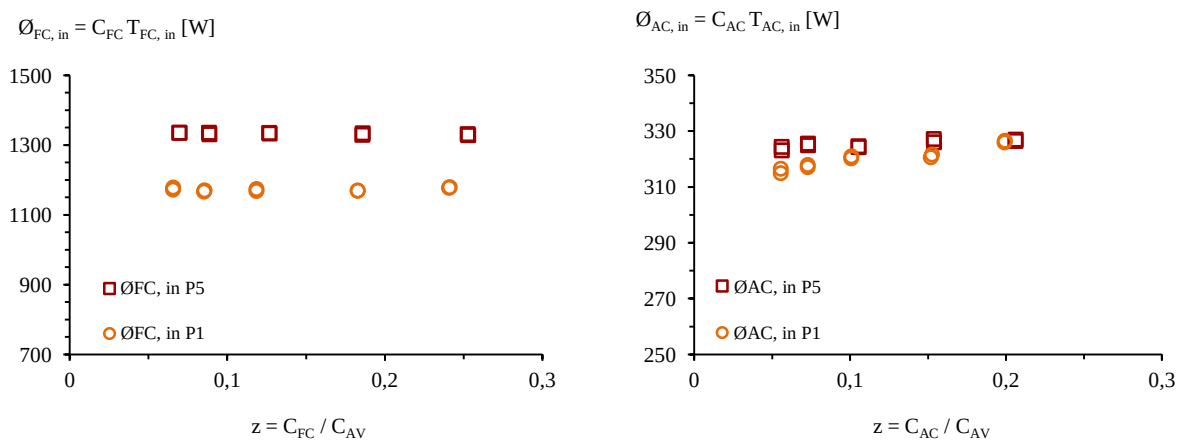


Figure 2.35 : Puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-PI)

Le graphique de la Figure 2.36 montre que la puissance maximum récupérable par l'air de ventilation lors de ces essais se situe autour de 1250 W à P1-V1 et de 1400 W à P5-V5. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles des essais précédents, ce qui est un résultat attendu, compte tenu de la présence de l'air de combustion.

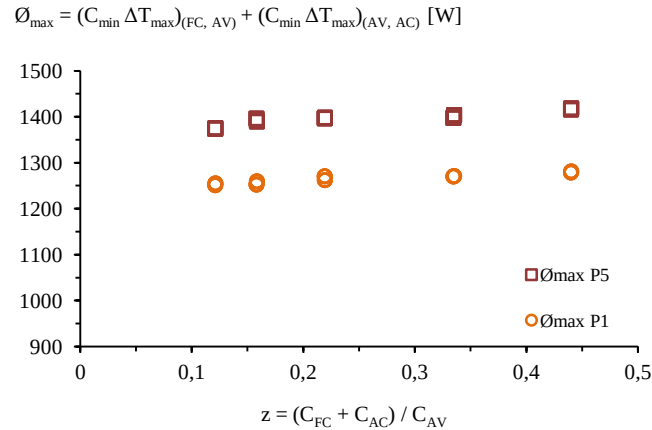


Figure 2.36 : Puissance maximum récupérable au sein du conduit échangeur (CETP-PI)

Les deux graphiques de la Figure 2.37 présentent les valeurs de la puissance maximum récupérable par l'air de ventilation respectivement sur les fumées et sur l'air de combustion. Quel que soit le régime de l'appareil et quel que soit le débit d'air de ventilation, la valeur de $\dot{Q}_{\max, AC \rightarrow AV}$ reste comprise entre 200 et 220 W. Le potentiel de récupération de la chaleur sur l'air de combustion représente donc seulement 15% du potentiel global. Il peut également être souligné que $\dot{Q}_{\max, AC \rightarrow AV}$ est légèrement plus élevé à P1-V1 qu'à P5-V5, car pour ce dernier mode les fumées échangent plus avec l'air de ventilation et réchauffent donc moins l'air de combustion dans la partie haute de la cheminée.

On peut également noter que les valeurs de $\dot{Q}_{\max, FC \rightarrow AV}$ correspondent aux valeurs de $\dot{Q}_{\max}$ déterminées lors des essais précédents. Ces valeurs s'établissent autour de 1050 W à P1-V1 et autour de 1150 W à P5-V5. Cependant, il ne faut pas voir ici une généralité mais plutôt un cas particulier. En effet, s'il est vrai que les mêmes valeurs de C_{FC} étaient attendues dans les deux séries d'essais, ce n'était pas forcément le cas pour les différences de température entre les fumées et l'air de ventilation $\Delta T_{\max (FC-AV)}$ au niveau de leur entrée respective dans le conduit échangeur.

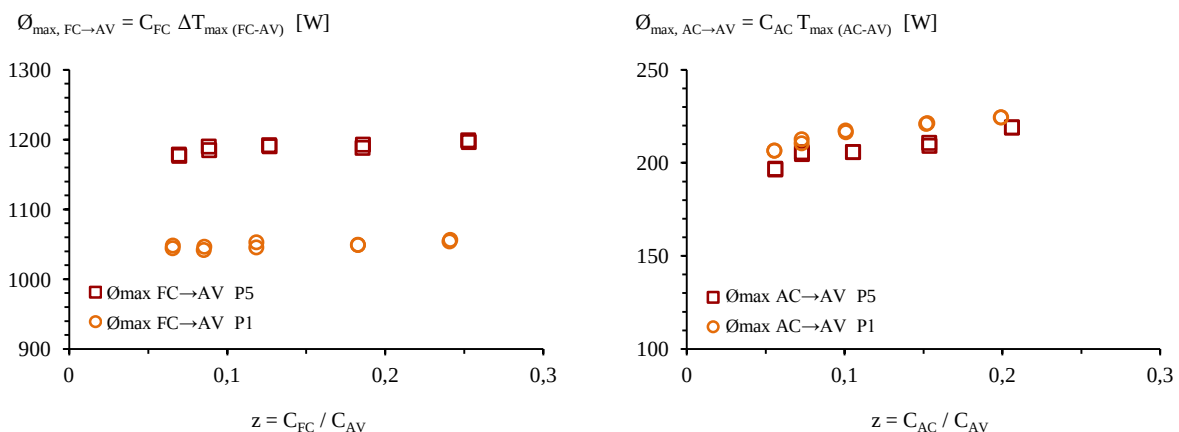


Figure 2.37 : Puissances maximum récupérables sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-PI)

➤ Bilan thermique

Le Tableau 2.17 donne les valeurs du défaut de bilan $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{\text{moy}}$ des puissances échangées lors des essais sur le CETP-PI, pour les régimes de fonctionnement P1-V1 et P5-V5 du poêle à granulés et pour les différentes valeurs du débit d'air de ventilation.

Tableau 2.17 : Défauts de bilan $\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{\text{moy}}$ pour les essais à P1-V1 et P5-V5 (CETP-PI)

	q_v, AV	$[\text{m}^3/\text{h}]$	330	250	180	120	90
P1-V1	$\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{\text{moy}}$	[%]	7,4	2,9	3,1	2,3	5,5
P5-V5	$\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{\text{moy}}$	[%]	7,0	4,9	4,9	10,2	7,8

De manière générale, les défauts de bilan sont **inférieurs à 10%** sur la plus grande partie des points de mesure, avec toutefois des écarts plus importants entre les puissances cédées et récupérées aux faibles et aux forts débits d'air de ventilation. En revanche, la correspondance entre les puissances échangées est meilleure que précédemment pour un débit d'air de ventilation compris entre 180 m³/h et 250 m³/h. On note également que les puissances cédées et récupérées suivent des courbures différentes, un phénomène était déjà présent, mais moins marqué, lors des essais précédents. Ici encore, on s'attachera par la suite à mieux comprendre l'origine de ces défauts de bilan en comparant les puissances obtenues expérimentalement avec celles obtenues en utilisant un modèle de conduit échangeur à triple paroi parfaitement isolé.

➤ Efficacité de l'échange

Les graphiques de la Figure 2.38 présentent les valeurs de l'efficacité E du CETP-PI, aux régimes de fonctionnement P1-V1 et P5-V5 du poêle à granulés. Ici encore, les courbes en pointillées délimitent les zones d'incertitude des différentes valeurs calculées. De manière générale, l'efficacité du CETP-PI est comprise entre **21 et 28%** sur la plage des débits d'air de ventilation étudiés, **soit une augmentation de 3% environ** par rapport à celle du CEDP-PI. Ici encore, on retrouve que l'efficacité de l'échange dépend peu du régime de fonctionnement du poêle à granulés, et qu'elle augmente à mesure que le rapport adimensionnel z diminue.

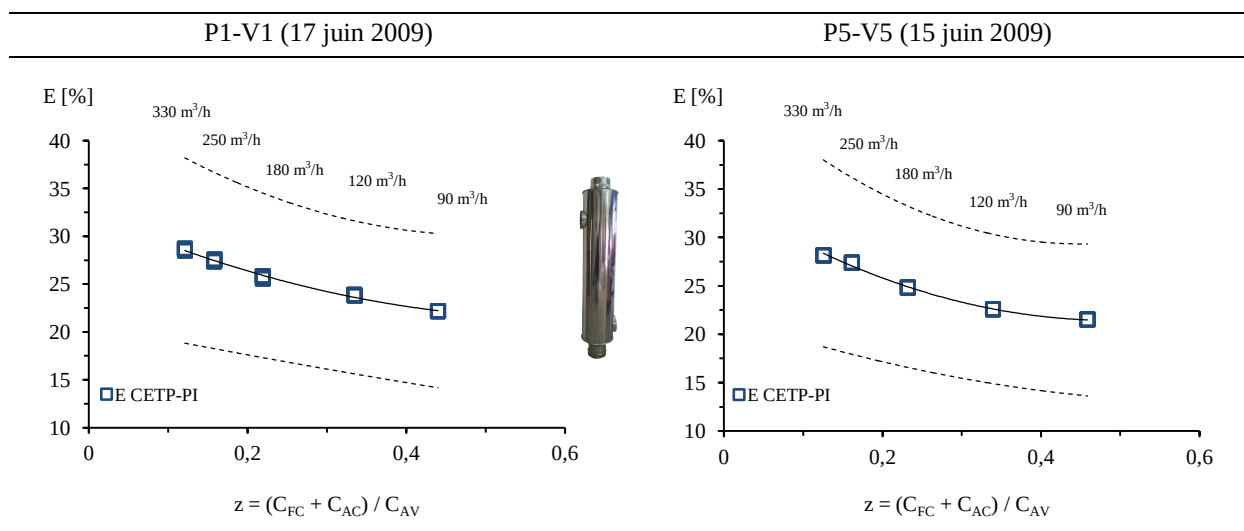


Figure 2.38 : Efficacité de l'échange au sein du conduit échangeur (CETP-PI)

➤ **Synthèse des principaux résultats des essais sur le CEDP-PI et le CETP-PI**

- Dans les deux phases d'essais, les puissances échangées varient peu suivant le régime de fonctionnement du poêle à granulés LISA. Pour un débit d'air de ventilation de $180 \text{ m}^3/\text{h}$ et au régime de fonctionnement maximum P5-V5, la puissance récupérée sur l'air de ventilation est de **270 W** environ pour le CEDP-PI et vaut environ **350 W** pour le CETP-PI.
- De manière générale, l'incertitude sur les bilans de puissance est inférieure à 10%. Les incertitudes les plus importantes proviennent des mesures réalisées sur les vitesses des différents fluides et sur les températures d'air de combustion.
- Au régime de fonctionnement P5-V5 du poêle à granulés, les puissances maximum récupérables sont de 1200 W environ pour le CEDP-PI et de 1400 W environ pour le CETP-PI, avec une contribution maximale d'environ 200 W du côté de l'air de combustion.
- Sur la plage des débits d'air de ventilation étudiés, l'efficacité de l'échange au sein du CEDP-PI est comprise entre **18 et 25%** et celle évaluée pour le CETP-PI varie entre **21 et 28%**, soit une légère augmentation de 3% environ.
- Lors des essais sur le CEDP-PI, la caractéristique globale de l'échange entre les fumées et l'air de ventilation a pu être évaluée expérimentalement. Elle est comprise entre **1,5 et 2 W/K**. Les essais sur le CETP-PI ne permettent pas d'évaluer expérimentalement la caractéristique globale des parois. Ces dernières doivent donc être évaluées de manière théorique en se basant sur des corrélations permettant d'obtenir les coefficients d'échange convectif au niveau de chaque paroi.

2.3.3. Essai préliminaire sur le système combiné

À l'issue des essais menés sur le CETP-PI, il est décidé de relier les piquages du conduit échangeur au réseau de soufflage d'une VMC-DF, pour tester la faisabilité du couplage des différents composants du système combiné de ventilation et de chauffage au bois que l'on souhaite développer.

Cet essai préliminaire sur le système combiné est réalisé fin juin 2009 et pour faciliter la connexion du conduit échangeur au réseau de ventilation, c'est le prototype n°3 de CETP qui possède les piquages du même côté qui est utilisé. En outre, aucune isolation n'est apportée entre le conduit échangeur et les parois du caisson, de sorte que la configuration adoptée pour cet essai se rapproche le plus possible des conditions réelles de mise en œuvre. Le système combiné se compose alors du poêle à granulés LISA, du prototype n°3 de conduit échangeur à triple paroi non isolé (CETP-NI) et de la VMC-DF à haut rendement AKOR HR du fabricant UNELVENT, dont les caractéristiques sont présentées en détail dans le Chapitre 3.

Le réseau de soufflage en aval de la VMC-DF est constitué de 10 m de gaines plastiques spiralées isolées, de 4 coudes et du CETP n°3. Il n'y a pas de réseau d'air extrait. La VMC-DF prélève directement de l'air dans l'ambiance qu'elle évacue ensuite à l'extérieur. L'équilibrage des débits d'air introduit et extrait est réalisé au moyen de diaphragmes implantés sur les piquages de raccordement au niveau de la centrale de ventilation.

Comme le poêle à granulés LISA n'est pas étanche, l'air de combustion est directement prélevé dans l'ambiance et un ventilateur supplémentaire impose le passage de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ d'air prélevé à l'extérieur dans l'espace annulaire du conduit de cheminée. L'essai est réalisé à la puissance P5, ce qui correspond à un débit volumique de fumées d'environ $30 \text{ m}^3/\text{h}$.

Enfin, un débit volumique d'environ $180 \text{ m}^3/\text{h}$ d'air de ventilation est imposé dans le réseau de soufflage. La mesure de vitesse s'effectue en aval du conduit échangeur, juste avant le soufflage de l'air neuf chauffé. Le débit d'air de ventilation dépend des pertes de charge du réseau considéré, des réglages de la VMC-DF et du choix de son allure de fonctionnement, voir Tableau 2.18. Pour l'essai préliminaire, les deux potentiomètres de la centrale, noté I et III, sont au maximum de leur course. Un débit de $180 \text{ m}^3/\text{h}$ est ainsi obtenu pour un fonctionnement de la VMC-DF à allure normale.

Tableau 2.18 : Débits d'air de ventilation en fonction des réglages et de l'allure de la VMC-DF

Débits [m^3/h]	Pot. I	min		moy		max	
	Pot. III	min	max	min	max	min	max
Allures VMC-DF	Réduite	50	50	100	100	155	155
	Normale	80	105	115	140	155	180
	Élevée	155	240	155	240	155	240

Le Tableau 2.19 donne les valeurs mesurées et calculées pour chacun des trois fluides étudiés lors de l'essai préliminaire de couplage. Les puissances cédées et récupérée y sont également reportées avec leur degré d'incertitude. L'essai ayant lieu fin juin, la température de l'environnement extérieur est de $24,5^\circ\text{C}$ et celle à l'intérieur du caisson s'élève aux environs de 50°C .

Tableau 2.19 : Valeurs mesurées et calculées lors de l'essai préliminaire de couplage

Paramètre	Unité	Fumée de Combustion	Air de Ventilation	Air de Combustion
ρ	[kg/m^3]	0,89	1,18	1,06
c_p	[$\text{J}/\text{kg.K}$]	1048	1007	1008
q_v	[m^3/h]	27,0	183,7	20,7
T_{in}	[$^\circ\text{C}$]	185,0	14,5	53,0
T_{out}	[$^\circ\text{C}$]	129,0	21,4	48,0
C	[W/K]	7,0	60,6	6,1
ΔT	[$^\circ\text{C}$]	56,0	6,9	5,0
$\emptyset$	[W]	392,0	418,1	30,5
$\Delta\emptyset/\emptyset$	[%]	± 17	± 6	± 10

La puissance récupérée par l'air de ventilation vaut environ **420 W**. Cette valeur correspond globalement à la somme des puissances cédées par les fumées et par l'air de combustion, ce qui laisse entendre qu'il n'y a presque pas d'échange entre l'air de combustion et l'air situé à l'intérieur du caisson. Compte tenu de la température élevée à l'intérieur du caisson, ce phénomène est tout à fait compréhensible et pour cet essai préliminaire, le conduit échangeur peut être considéré comme étant parfaitement isolé. L'efficacité de l'échange est quant à elle de **29,3%** avec une incertitude de $\pm 10\%$.

En synthèse, cet essai préliminaire confirme la possibilité d'obtenir un fonctionnement aérodynamique correct du système combiné de ventilation et de chauffage au bois. Il permet également de disposer d'un précédent sur les conditions de réalisation de tels essais. Enfin, un processus d'amélioration globale du système combiné est engagé à l'issue de cet essai.

2.3.4. Voies d'optimisation du système et des essais

➤ Le poêle à granulés

Compte tenu des problématiques rencontrées lors des essais et des exigences des bâtiments de type BBC, il apparaît nécessaire de travailler avec un poêle à granulés à *cycle de combustion étanche* pour que la totalité de l'air de combustion utilisé par l'appareil soit bien prélevé à l'extérieur de l'habitation via le conduit concentrique de cheminée. Cela permettrait notamment de conserver le fonctionnement d'origine du poêle, de ne pas risquer de déséquilibrer la VMC-DF et d'empêcher tout refoulement des produits de combustion dans l'ambiance comme cela a été vu dans le Chapitre 1.

➤ La VMC double flux et le réseau de ventilation

Lors des prochains essais, le même modèle de VMC-DF à haut rendement peut être conservé. L'ensemble du réseau de ventilation doit cependant être réalisé avec des gaines métalliques rigides lisses de manière à limiter les pertes de charge et à permettre la mesure des débits d'air entrant et sortant. L'isolation de l'ensemble des conduites du réseau peut également être envisagée pour limiter l'influence de l'ambiance sur la température de l'air de ventilation. Enfin, le réseau de ventilation devra être correctement équilibré d'un point de vue des débits d'air neuf introduit et d'air vicié extrait avant de mener les prochains essais. L'introduction de régulateurs au niveau des différentes branches du réseau et/ou l'utilisation de diaphragmes pourra faciliter cette opération.

➤ Le conduit échangeur à triple paroi

D'après les précédents essais menés sur les prototypes n° 2 et 3 du conduit échangeur à triple paroi, la puissance récupérée sur l'air de ventilation est comprise entre 300 et 400 W environ et l'efficacité de l'échange est comprise entre 20 et 30%.

Différentes voies d'actions peuvent être proposées pour augmenter ces performances tout en respectant les autres contraintes définies dans le cahier des charges, c'est-à-dire avoir une bonne intégration du conduit échangeur dans le conduit étanche, limiter les pertes de charge sur les différents fluides et limiter le coût de fabrication du conduit échangeur.

Une *première voie d'action* consiste à installer une reprise d'air chaud au dessus du poêle à granulés et de mélanger cet air avec l'air neuf, mais le système n'aurait plus alors l'avantage de fonctionner en tout air neuf. Cette proposition n'est donc pas retenue.

Une *autre voie d'action* consiste à augmenter les surfaces d'échange avec l'air de ventilation et à augmenter les coefficients d'échange au niveau des parois intérieure et intermédiaire du conduit échangeur. Il est également préférable que les fumées aient une température élevée en entrée du conduit échangeur, donc de conserver son positionnement à la base de la cheminée.

En ce qui concerne l'augmentation de la surface d'échange, on rappelle que les prototypes n°2 et n°3 de CETP ont une hauteur de 1250 mm et qu'il s'agit de la hauteur maximale pouvant être usinée par le fabricant pour un élément droit de conduit. De plus, augmenter le nombre des ailettes sur la paroi extérieure du tube transportant les fumées est une opération délicate pour le fabricant et qui ne se justifie pas forcément en termes d'augmentation des performances d'échange, comme on le montrera plus tard en faisant une étude paramétrique sur cet aspect à l'aide du modèle du CETP.

La Figure 2.39 donne les schémas des deux propositions formulées lors d'une réunion technique tenue fin juillet 2009 avec le constructeur pour augmenter la hauteur de la zone d'échange :

- Première proposition : Associer 2 CETP en série l'un après l'autre.

Cette solution présente l'avantage d'utiliser directement les derniers prototypes existants, mais elle implique l'introduction de nouvelles pertes de charge sur le réseau de ventilation à cause des deux coudes de raccordement supplémentaires.

- Seconde proposition : Décomposer le CETP en deux parties avec un emboîtement triple paroi

Cette solution permet d'augmenter la hauteur totale du conduit échangeur et plus particulièrement celle de la zone de récupération ailetée tout en ne conservant qu'une seule zone d'entrée et de sortie pour l'air de ventilation. Les deux éléments haut et bas du conduit échangeur peuvent être fabriqués avec une hauteur de 1 m chacun, les piquages de raccordement de l'air de ventilation peuvent être orientés de manière indépendante et un module supplémentaire d'échange peut éventuellement être inséré entre la partie haute et la partie basse. La problématique principale de ce nouveau prototype concerne l'étanchéité entre les zones d'écoulement au niveau de l'emboîtement triple paroi des deux parties du conduit. Le constructeur n'ayant jamais mis en œuvre ce type de solution, les conditions de réalisation d'un tel emboîtement doivent être étudiées plus en détail.

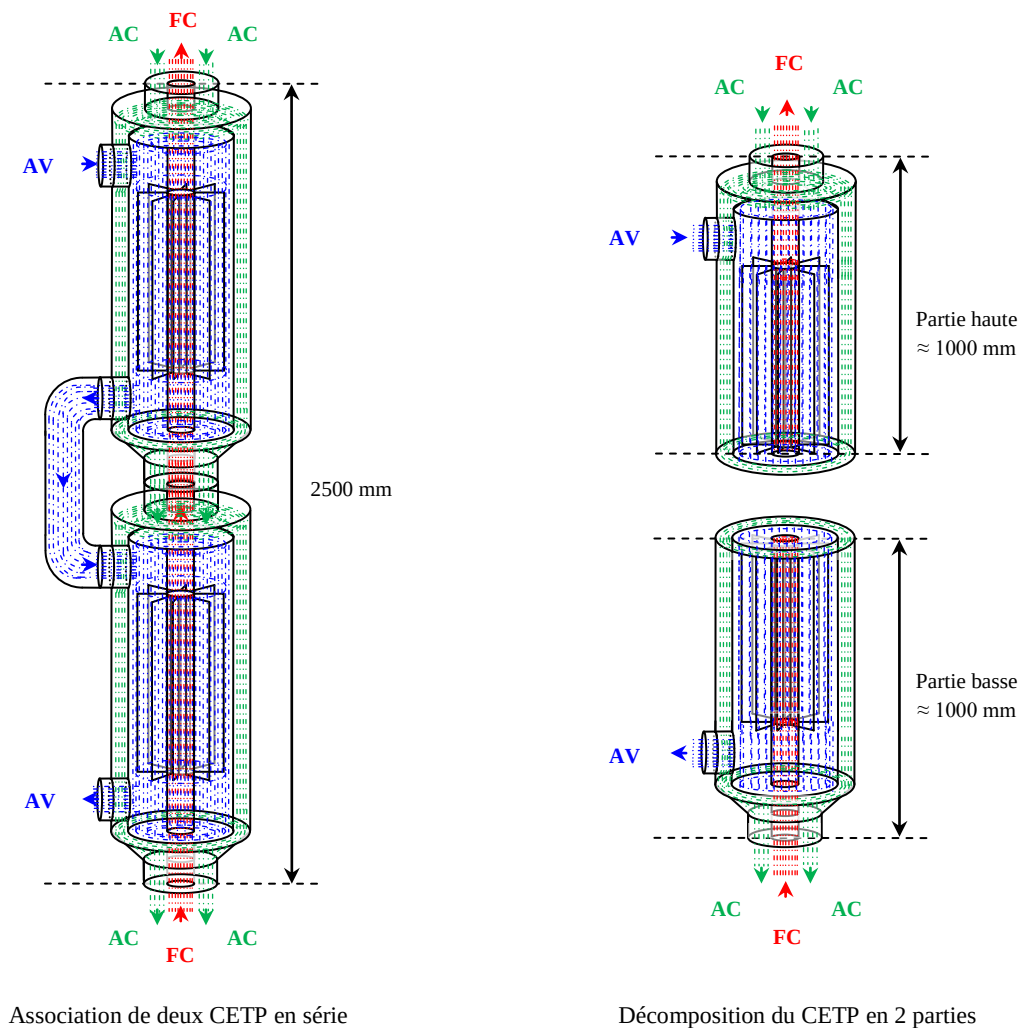


Figure 2.39 : Schémas des deux propositions d'allongement du conduit échangeur à triple paroi

Enfin, en ce qui concerne l'amélioration des coefficients d'échange par convection au niveau des parois, les différentes surfaces peuvent être travaillées (tubes torsadés, parois corruguées...) et/ou des éléments favorisant le transfert de chaleur peuvent être introduits dans les espaces de circulation des fluides pour en augmenter la turbulence et pour qu'ils s'écoulent au plus près des parois (ailettes sur la surface extérieure du tube central, bande métallique spiralée à l'intérieur du tube central...), comme cela est illustré sur la Figure 2.40.

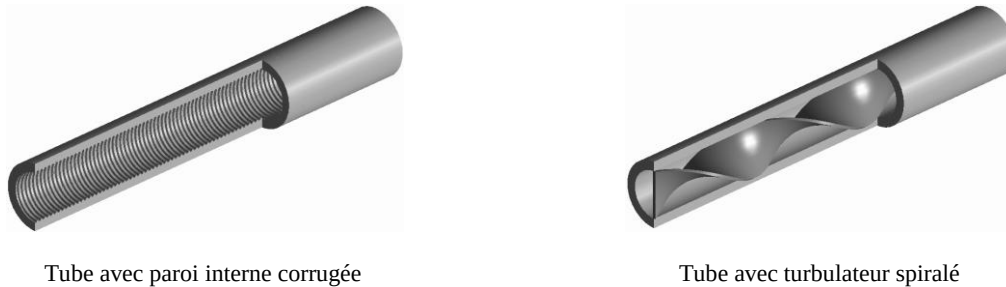


Figure 2.40 : Exemples de solution d'optimisation de l'échange convectif à l'intérieur d'un tube

➤ Le conduit de cheminée

L'air de combustion étant prélevé à l'extérieur, sa température d'entrée au niveau du conduit échangeur dépend de la hauteur des éléments de conduit de cheminée situés au dessus de celui-ci. Le potentiel d'échange du côté de l'air de combustion peut donc être légèrement augmenté avec une plus grande hauteur du conduit de cheminée. Il faut aussi tenir compte du fait que les fumées peuvent condenser si elles sont trop refroidies. Une hauteur totale de cheminée de 5 à 6 m peut être conservée.

➤ L'instrumentation du banc d'essai

Compte tenu des incertitudes de mesure obtenues, une amélioration peut être apportée au niveau de l'instrumentation du banc, tant sur la nature que sur le positionnement de certains capteurs.

Les mesures effectuées sur les fumées ont lieu dans des éléments droits de prise de mesure (EDPM) situés juste au dessus et au dessous du conduit échangeur. Les guides de sonde utilisés pour traverser l'espace annulaire forment alors des ponts thermiques et favorisent le transfert de la chaleur depuis la paroi intérieure vers la paroi extérieure, mais il s'agit du seul moyen d'introduire nos capteurs au centre du tube dans lequel s'élèvent les fumées, tout en restant étanche. Cette technique de mesure est donc conservée, ainsi que les capteurs jusqu'alors utilisés.

La température de l'air de combustion est également relevée dans les EDPM situés juste au dessus et au dessous du conduit échangeur. Cependant, compte tenu des différences observées entre les valeurs mesurées en trois points de la section annulaire, il apparaît nécessaire de multiplier les relevés de température dans chaque anneau. De plus, compte tenu des valeurs de température atteintes par l'air de combustion, un capteur plus précis pourrait être utilisé pour mesurer la vitesse du fluide.

La température de l'air de ventilation à l'entrée et à la sortie du conduit échangeur doit être mesurée suffisamment loin des piquages pour être homogène. Il faut également prévoir l'acquisition de deux nouveaux capteurs de vitesse pour mesurer le débit de l'air neuf (AN) et de l'air extrait (AE) en amont et en aval de la VMC double flux.

2.4. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE MATHÉMATIQUE

L'objectif de cette partie est de développer un modèle mathématique pour le conduit échangeur à triple paroi non isolé (CETP-NI). Ce type de conduit échangeur peut être considéré de manière plus générale comme un échangeur de chaleur à triple tube concentrique non isolé dans lequel circulent 3 fluides différents, à savoir les fumées de combustion (FC), l'air de ventilation (AV) et l'air de combustion (AC). Ces 3 fluides gazeux sont en écoulement parallèle et sont séparés par des parois métalliques en acier inoxydable. Compte tenu des lieux d'entrée et de sortie de l'air de ventilation, la configuration de l'échange est à contre-courant du côté des fumées et à co-courant du côté de l'air de combustion. Enfin, des échanges peuvent aussi s'opérer entre l'air de combustion et l'environnement extérieur (OUT) à travers la paroi externe du conduit échangeur.

À partir des paramètres géométriques du conduit échangeur et de la température extérieure, ainsi que du débit massique et de la température d'entrée de chaque fluide, le modèle doit permettre d'obtenir la température de sortie des trois fluides en écoulement, puis l'efficacité de l'échange. Le schéma de la Figure 2.41 représente les trois fluides en écoulement au sein du CETP-NI. Les fumées de combustion (FC) sont évacuées par le tube intérieur. L'air de ventilation (AV) se réchauffe en circulant dans l'espace annulaire central compris entre le tube intérieur et le tube intermédiaire. Enfin l'air de combustion (AC) circule de haut en bas dans l'espace annulaire extérieur qui est compris entre le tube intermédiaire et le tube externe du conduit échangeur. Ainsi, la configuration de l'échange correspond à un écoulement à contre-co-courant, comme défini dans la littérature [Sekulic, 1995b].

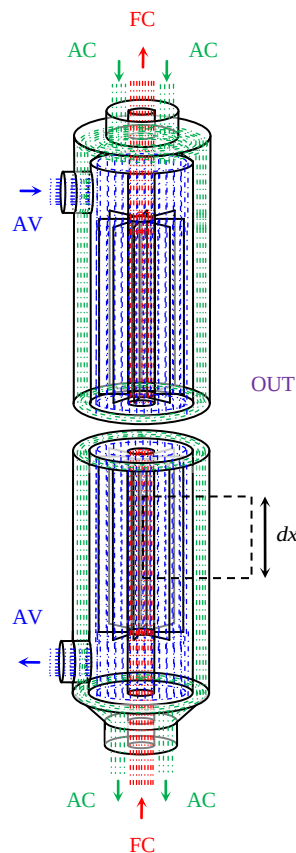


Figure 2.41 : Représentation schématisique du CETP-NI

2.4.1. Analyse théorique

➤ Revue des travaux présents dans la littérature

Après la première analyse réalisée par Morley sur les échanges thermiques ayant lieu entre trois fluides [Morley, 1933], différentes études [Rabinovich, 1961] [Wolf, 1964] [Aulds, 1966] ont été menées sur des échangeurs impliquant trois fluides en écoulement parallèle en régime permanent. À titre d'exemple, une étude théorique significative a été développée par Sorlie pour un échangeur de chaleur à trois fluides en écoulement parallèle avec deux zones de contact thermique [Sorlie, 1962].

Zuritz a ensuite développé un ensemble d'équations analytiques qu'il a ensuite résolu en utilisant la méthode de la transformée de Laplace pour calculer la distribution des températures dans un échangeur de chaleur à triple tube concentrique [Zuritz, 1990]. D'autres études ont également porté sur les échanges ayant lieu entre trois fluides avec la prise en considération de trois zones de communication thermique [Krishnamurty, 1964] [Shpil'rain, 1982, 1983].

Dans le cas des échangeurs à triple tube concentrique, quatre configurations majeures d'écoulement ont été identifiées [Sekulic, 1994], ainsi qu'une série de paramètres adimensionnels permettant de caractériser les échanges. Une étude approfondie réalisée par Sekulic et Shah sur la conception et l'évaluation de la performance des échangeurs de chaleur à trois fluides a ensuite permis d'unifier l'approche théorique pour ce type d'échangeur lorsque le régime est stationnaire et que le système est parfaitement isolé des variations extérieures [Sekulic, 1995b]. Quelques travaux tiennent également compte des échanges pouvant avoir lieu avec l'ambiance, tels ceux d'Ameel dans lesquels deux fluides échangent de la chaleur entre eux, mais aussi avec l'ambiance extérieure [Ameel, 2000], ou encore les simulations numériques réalisées par García-Valladares pour détailler le comportement thermique dynamique des échangeurs de chaleur à triple tube concentrique [García-Valladares, 2004].

Toutefois, après une revue de la littérature existante, il apparaît que des solutions analytiques n'ont pas encore été formulées pour le cas d'un échangeur à triple tube concentrique non isolé de l'ambiance extérieure. Pour établir les solutions analytiques donnant la distribution des températures dans le cas du CETP-NI, le modèle mathématique développé dans la suite de cette partie se base principalement sur les démarches adoptées par Prasad dans ses travaux sur les échangeurs de chaleur à double tube concentrique sans isolation au niveau de leur surface extérieure [Prasad, 1987, 1988] et par Ünal dans ses travaux sur les échangeurs de chaleur à triple tube concentrique parfaitement isolés de leur environnement extérieur [Ünal, 1998, 2001, 2003]. Ünal a notamment mis en évidence que la performance thermique est fortement liée aux rapports des diamètres de l'échangeur de chaleur.

➤ Modèle physique du CETP-NI

Comme illustré sur le schéma de la Figure 2.42, qui représente une demi-coupe longitudinale d'un échangeur à triple tube concentrique, le modèle physique du CETP-NI se compose de trois tubes concentriques formant une zone d'écoulement circulaire au centre, puis deux zones d'écoulement annulaire en périphérie. Les fumées de combustion (FC), représentées par le fluide 1, pénètrent dans le tube intérieur à l'abscisse $x = L$ et circulent suivant la direction des x négatifs, tandis que l'air de ventilation (AV) et l'air de combustion (AC), respectivement représentés par les fluides 2 et 3, entrent dans l'échangeur de chaleur à l'abscisse $x = 0$ et circulent dans les sections annulaires suivant la direction des x positifs. Par ailleurs, un transfert de chaleur peut s'opérer avec l'air ambiant (OUT) autour de l'échangeur, car la surface extérieure de l'ensemble n'est pas isolée.

L'analyse théorique du CETP-NI pour une configuration d'écoulement à contre-co-courant est conduite en tenant compte des hypothèses suivantes :

- Le système est en régime permanent ;
- Les fluides ne subissent pas de changement de phase ;
- Les propriétés thermophysiques des fluides sont constantes et uniformes ;
- Les écoulements sont pleinement développés du point de vue hydrodynamique et thermique ;
- La conduction thermique longitudinale dans les fluides et les parois est négligée ;
- Les coefficients d'échange sont indépendants de l'abscisse considérée ;
- La température de l'environnement extérieur est constante.

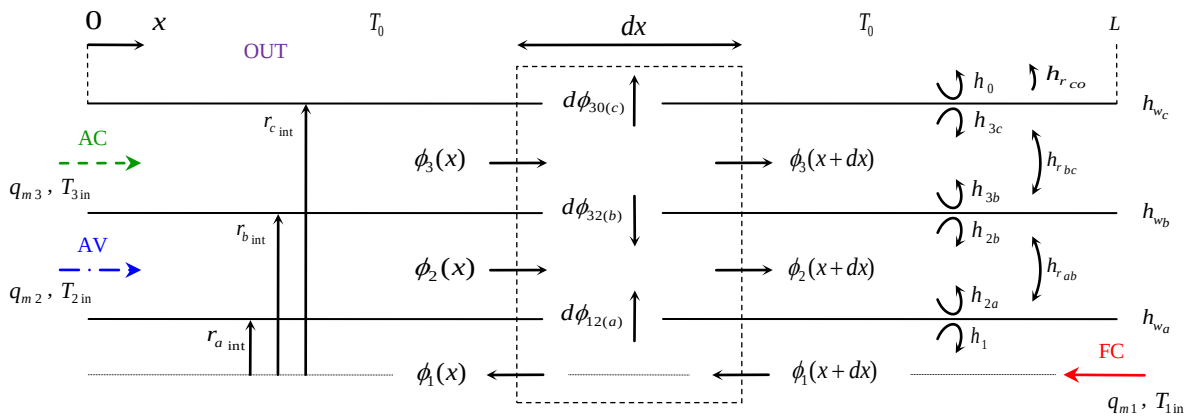


Figure 2.42 : Représentation schématique du modèle physique de CETP-NI

➤ Modèle mathématique

En tenant compte des hypothèses précédentes, le bilan d'énergie sur un volume de contrôle de longueur dx conduit au système d'équations suivant :

$$d\phi_1 = d\phi_{12(a)} \quad (2.33)$$

$$d\phi_2 = d\phi_{12(a)} + d\phi_{32(b)} \quad (2.34)$$

$$d\phi_3 = -d\phi_{32(b)} - d\phi_{30(c)} \quad (2.35)$$

où les indices 0, 1, 2 et 3 renvoient respectivement à l'ambiance extérieure, aux fumées de combustion dans le tube central, à l'air de ventilation dans le premier espace annulaire et à l'air de combustion dans le second espace annulaire.

Dans les équations (2.33) et (2.35), les densités de flux $d\phi_1$ et $d\phi_3$ représentent la chaleur perdue par les fluides chauds 1 et 3 entre les abscisses x et $x+dx$. Dans l'équation (2.34), la densité de flux $d\phi_2$ correspond à la chaleur récupérée par le fluide froid 2 entre les abscisses x et $x+dx$.

Sur un volume de contrôle défini entre x et $x+dx$, la densité de flux de chaleur $d\phi$ cédée ou récupérée par un fluide n qui ne subit pas de changement de phase peut s'écrire en fonction du débit massique q_m , de la capacité calorifique massique c_p et du différentiel de température dT .

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad d\phi_n = \phi_n(x+dx) - \phi_n(x) = (q_m c_p)_n dT_n = C_n dT_n \quad (2.36)$$

Au même instant, pour le même volume de contrôle, la densité de flux de chaleur $d\phi_{ij(k)}$ échangée entre un fluide chaud i et un fluide froid j à travers une paroi k peut s'exprimer en fonction de la différence des températures de film $T_i - T_j$ et du coefficient d'échange global U_k associé à l'élément de surface d'échange dA_k :

$$d\phi_{ij(k)} = U_k dA_k (T_i - T_j) \quad (2.37)$$

$$\text{avec } \forall k \in \{a, b, c\} \quad dA_k = 2\pi r_k dx = \pi D_k dx = P_k dx \quad (2.38)$$

En effectuant une analogie électrique, il est possible d'établir un circuit équivalent décrivant les différents modes de transfert de chaleur au sein du CETP-NI, comme présenté par la Figure 2.43. Les résistances surfaciques de conduction, de convection et de rayonnement, notées respectivement $1/h_w$, $1/h$ et $1/h_r$, sont calculées à partir des équations (2.43) à (2.45).

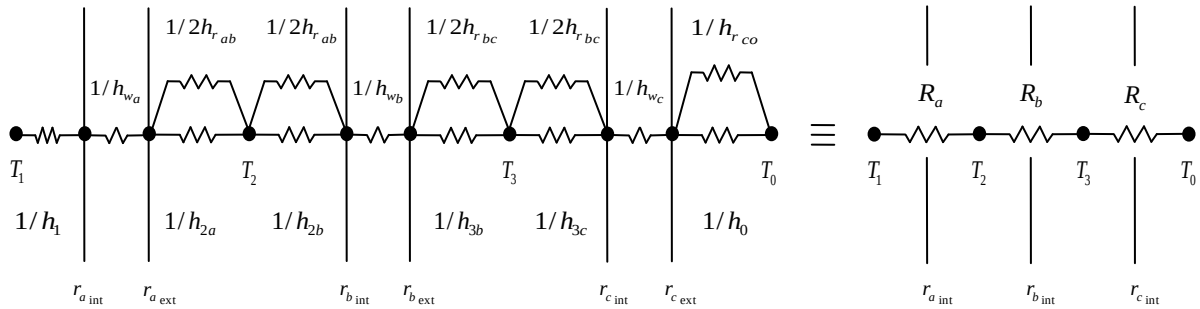


Figure 2.43 : Schéma électrique analogique des transferts de chaleur au sein du CETP-NI

Dans ce schéma analogique, l'expression du transfert de chaleur par rayonnement entre les parois des espaces annulaires est supposée pouvoir être divisée en deux parties impliquant la température apparente du fluide circulant entre les parois, tout en conservant la même valeur de résistance thermique par rayonnement. De cette façon, la résistance thermique R_k de chaque tube k et le coefficient d'échange global U_k associé arbitrairement à la surface interne $A_{k \text{ int}} = 2\pi r_{k \text{ int}} L$, peuvent être exprimés comme suit :

$$R_a = \frac{1}{U_a A_{a \text{ int}}} = \frac{1}{h_1 A_{a \text{ int}}} + \frac{1}{h_{wa} A_{a \text{ int}}} + \frac{1}{(h_{2a} + 2h_{rab}) A_{a \text{ int}}} \left(\frac{r_{a \text{ int}}}{r_{a \text{ ext}}} \right) \quad (2.39)$$

$$R_b = \frac{1}{U_b A_{b \text{ int}}} = \frac{1}{(h_{2b} + 2h_{rab}) A_{b \text{ int}}} + \frac{1}{h_{wb} A_{b \text{ int}}} + \frac{1}{(h_{3b} + 2h_{rbc}) A_{b \text{ int}}} \left(\frac{r_{b \text{ int}}}{r_{b \text{ ext}}} \right) \quad (2.40)$$

$$R_c = \frac{1}{U_c A_{c \text{ int}}} = \frac{1}{(h_{3c} + 2h_{rbc}) A_{c \text{ int}}} + \frac{1}{h_{wc} A_{c \text{ int}}} + \frac{1}{(h_0 + h_{rco}) A_{c \text{ int}}} \left(\frac{r_{c \text{ int}}}{r_{c \text{ ext}}} \right) \quad (2.41)$$

Dans le cas du CETP-NI développé dans cette étude, des ailettes ont été ajoutées sur la surface externe du tube central pour augmenter la récupération de chaleur sur l'air de ventilation. Ainsi, il est nécessaire d'introduire l'efficacité globale de la surface d'échange, notée η_o . Le coefficient d'échange convectif de la paroi externe du tube central h_{2a} doit alors être remplacé par h_{2af} dans l'équation (2.39).

$$h_{2af} = \eta_o \frac{A_{a\ tot}}{A_{a\ int}} h_{2a} \quad (2.42)$$

avec
$$\eta_o = 1 - \frac{nb_f A_f}{A_{tot}} (1 - \eta_f)$$

et où η_f est l'efficacité d'une ailette, nb_f est le nombre d'ailettes, A_f est la surface d'une ailette et $A_{a\ tot}$ est la surface totale d'échange correspondant à la fois à l'ensemble de la surface ailetée et à la portion de surface du tube qui est exposée à l'écoulement. La littérature propose ensuite des expressions de l'efficacité de l'ailette η_f pour différentes configurations [Incropera, 2006].

Les expressions présentées dans les paragraphes suivants sont utilisées pour évaluer les différents coefficients décrivant les échanges de chaleur par conduction, convection et rayonnement.

- Coefficients d'échange de chaleur par conduction

Pour une paroi cylindrique k , la résistance thermique de conduction R_{wk} peut être exprimée comme l'inverse du produit du coefficient d'échange par conduction h_{wk} et de la surface intérieure de la paroi $A_{k\ int}$ à laquelle il est associé. Il est ensuite possible de déterminer ces grandeurs en fonction de la conductivité thermique de la paroi λ_k du rapport des rayons extérieur et intérieur $r_{k\ ext} / r_{k\ int}$ et de la longueur de l'échangeur L , à partir de l'expression suivante :

$$\forall k \in \{a, b, c\} \quad R_{wk} = \frac{1}{h_{wk} A_{k\ int}} = \frac{\ln(r_{k\ ext} / r_{k\ int})}{2 \pi \lambda_k L} \quad (2.43)$$

- Coefficient d'échange de chaleur par convection

Le coefficient d'échange convectif h_i lié au fluide i s'obtient à partir du nombre de Nusselt Nu , de la conductivité thermique du fluide λ_i et du diamètre hydraulique de la veine d'écoulement D_h :

$$\forall i \in \{1, 2, 3, 0\} \quad h_i = Nu \lambda_i / D_h \quad (2.44)$$

où $D_h = D_{externe} - D_{interne}$ pour un espace annulaire entre deux parois cylindriques (interne et externe).

Les coefficients de convection moyens peuvent alors être déterminés à partir des corrélations disponibles dans la littérature.

- En convection forcée et en régime laminaire ($Re \leq 2300$), la corrélation proposée par Sieder et Tate [Incropera, 2006] peut être utilisée pour déterminer le nombre de Nusselt à la fois dans le tube central et dans les espaces annulaires :

$$Nu = 1,86 (Re Pr D_h / L)^{1/3}$$

- En convection forcée et en régime turbulent ou de transition ($Re > 2300$), c'est la corrélation de Colburn [Incropera, 2006] qui est utilisée pour calculer le nombre de Nusselt dans le tube central et ce sont les corrélations développées par Monrad et Pelton qui sont utilisées dans les espaces annulaires [Jakob, 1949] [García-Valladares, 2004].

Tube central $Nu = 0,023 Re^{4/5} Pr^{1/3}$

Espaces annulaires $Nu = 0,020 Re^{4/5} Pr^{1/3} (D_{\text{externe}}/D_{\text{interne}})^{0,53}$ pour la paroi interne

$Nu = 0,027 Re^{4/5} Pr^{1/3}$ pour la paroi externe

- En convection naturelle, le long de la paroi verticale extérieure du conduit échangeur, les corrélations suivantes [Incropera, 2006] sont utilisées :

Régime laminaire $10^4 \leq Ra \leq 10^9$ $Nu = 0,59 Ra^{1/4}$

Régime turbulent $10^9 \leq Ra \leq 10^{13}$ $Nu = 0,10 Ra^{1/3}$

- Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement $h_{r\,kl}$ entre deux surfaces cylindriques grises diffusantes k et l formant une enceinte fermée, peut être exprimé comme suit [Incropera, 2006] :

$$\forall (kl) \in \{(ab);(bc);(co)\} \quad h_{r\,kl} = \sigma F_{F_{kl}} (T_k^2 + T_l^2) (T_k + T_l) \approx \sigma F_{F_{kl}} 4 T_{m\,kl}^3 \quad (2.45)$$

avec $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}^4)$ la constante de Stephan-Boltzmann et les expressions suivantes pour les différents facteurs de formes :

$$F_{Fab} = \left[\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \left(\frac{r_{a\,\text{ext}}}{r_{b\,\text{int}}} \right) \right]^{-1} \quad F_{Fbc} = \left[\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \left(\frac{r_{b\,\text{ext}}}{r_{c\,\text{int}}} \right) \right]^{-1} \quad F_{Fco} = \varepsilon_c$$

En première approximation, les températures moyennes apparentes peuvent être déterminées par :

$$T_{m\,ab} \approx \frac{T_{m\,1} + T_{m\,2}}{2} \quad T_{m\,bc} \approx \frac{T_{m\,2} + T_{m\,3}}{2} \quad T_{m\,co} \approx \frac{T_{m\,3} + T_0}{2}$$

où $\forall i \in \{1,2,3\}$ la température moyenne du fluide i est initialisée avec : $T_{m\,i} = T_{i\,\text{in}}$

puis est calculée de façon itérative, suivant l'expression : $T_{m\,i} = \frac{T_{i\,\text{in}} + T_{i\,\text{out}}}{2}$

La procédure d'itération prend fin lorsque pour chacun des fluides étudiés la différence entre les deux dernières valeurs calculées de $T_{i\,\text{out}}$ est inférieure à $0,01^\circ\text{C}$.

Ainsi, en considérant les expressions du coefficient d'échange global U_k et de l'élément de surface associé dA_k données par les équations (2.38) à (2.41) pour chacune des parois k du conduit échangeur, le système d'équations (2.33) à (2.35) qui gouverne le bilan d'énergie s'écrit :

$$C_1 dT_1 = U_a dA_a (T_1 - T_2) \quad (2.46)$$

$$C_2 dT_2 = U_a dA_a (T_1 - T_2) + U_b dA_b (T_3 - T_2) \quad (2.47)$$

$$C_3 dT_3 = -U_b dA_b (T_3 - T_2) - U_c dA_c (T_3 - T_0) \quad (2.48)$$

Pour simplifier les écritures et permettre un adimensionnement des variables de température, les termes suivants sont définis :

$$\forall k \in \{a, b, c\} \quad A_k = A_{k\text{int}} \quad \text{et} \quad \Delta T_{\text{in}} = \frac{C_1(T_{1\text{in}} - T_{2\text{in}}) + C_3(T_{3\text{in}} - T_{2\text{in}})}{C_1 + C_3}$$

ainsi que les paramètres adimensionnels suivants :

$$X = \frac{x}{L} \quad C_{r1} = \frac{C_1}{C_2} \quad C_{r3} = \frac{C_3}{C_2}$$

$$N_1 = \frac{U_a A_a}{C_1} \quad N_3 = \frac{U_b A_b}{C_3} \quad N_0 = \frac{U_c A_c}{C_3}$$

$$\theta_1 = \frac{T_1 - T_0}{\Delta T_{\text{in}}} \quad \theta_2 = \frac{T_2 - T_0}{\Delta T_{\text{in}}} \quad \theta_3 = \frac{T_3 - T_0}{\Delta T_{\text{in}}}$$

En utilisant les différentes écritures définies ci-dessus, le système d'équation gouvernant le bilan d'énergie s'écrit alors :

$$\frac{d\theta_1}{dX} = N_1\theta_1 - N_1\theta_2 \quad (2.49)$$

$$\frac{d\theta_2}{dX} = N_1C_{r1}\theta_1 - (N_1C_{r1} + N_3C_{r3})\theta_2 + N_3C_{r3}\theta_3 \quad (2.50)$$

$$\frac{d\theta_3}{dX} = N_3\theta_2 - (N_0 + N_3)\theta_3 \quad (2.51)$$

avec les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} \theta_1(1) &= \theta_{1\text{in}} \\ \theta_2(0) &= \theta_{2\text{in}} \\ \theta_3(0) &= \theta_{3\text{in}} \end{aligned} \quad (2.52)$$

En découplant les équations (2.49) à (2.51), le système linéaire homogène suivant composés de trois équations différentielles ordinaires du 3^{ème} ordre est obtenu :

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \frac{d^3 \theta_n}{dX^3} + A \frac{d^2 \theta_n}{dX^2} + B \frac{d \theta_n}{dX} + C \theta_n = 0 \quad (2.53)$$

où les coefficients A , B et C sont définis par :

$$A = N_0 + N_1(C_{r1} - 1) + N_3(C_{r3} + 1) \quad B = N_1(N_0 + N_3)(C_{r1} - 1) + N_3C_{r3}(N_0 - N_1) \quad C = -N_0N_1N_3C_{r3}$$

Les solutions générales du système d'équations différentielles de l'équation (2.53) s'écrivent sous la forme d'une somme de fonctions exponentielles en X :

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \theta_n(X) = \alpha_n e^{\lambda_1 X} + \beta_n e^{\lambda_2 X} + \gamma_n e^{\lambda_3 X} \quad (2.54)$$

où les coefficients α_n , β_n et γ_n peuvent être déterminés grâce aux conditions limites pour $n = 1, 2$ et 3 comme cela sera montré dans la suite et où les coefficients λ_1 , λ_2 et λ_3 sont les solutions de l'équation caractéristique du 3^{ème} degré associée :

$$\lambda^3 + A \lambda^2 + B \lambda + C = 0 \quad (2.55)$$

La méthode de Cardan est utilisée pour résoudre l'équation (2.55). Les paramètres p et q sont ainsi définis comme solutions de l'équation réduite suivante :

$$x^3 + p x^2 + q = 0 \quad (2.56)$$

$$\text{avec} \quad x = \lambda + \frac{A}{3} \quad p = -\frac{A}{3} + B \quad q = \frac{A}{27}(2A^2 - 9B) + C$$

En tenant compte de la plage de variation des paramètres de notre étude, la valeur du discriminant Δ de l'équation réduite est toujours négative,

$$\Delta = q^2 + \frac{4}{27} p^3 < 0$$

alors l'équation (2.56) possède trois racines réelles distinctes :

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad x_n = 2 \sqrt{\frac{-p}{3}} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(\frac{-q}{2 \sqrt{\frac{27}{-p^3}}} \right) + \frac{2n\pi}{3} \right] \quad (2.57)$$

et les trois solutions de l'équation (2.55) s'écrivent :

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \lambda_n = x_n - \frac{A}{3} \quad (2.58)$$

Puis, en utilisant les équations (2.49) à (2.51), les conditions aux limites données par l'équation (2.52) et la forme des solutions présentée par l'équation (2.54), un système de trois équations traduisant les relations aux limites peut être obtenu pour chaque fluide.

Fluide 1

$$\theta_1(0) = \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 \quad (2.59)$$

$$\left. \frac{d\theta_1}{dX} \right|_{X=0} = \alpha_1 \lambda_1 + \beta_1 \lambda_2 + \gamma_1 \lambda_3 = N_1 [\theta_1(0) - \theta_2(0)] \quad (2.60)$$

$$\theta_1(1) = \alpha_1 e^{\lambda_1} + \beta_1 e^{\lambda_2} + \gamma_1 e^{\lambda_3} \quad (2.61)$$

Fluide 2

$$\theta_2(0) = \alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2 \quad (2.62)$$

$$\left. \frac{d\theta_2}{dX} \right|_{X=0} = \alpha_2 \lambda_1 + \beta_2 \lambda_2 + \gamma_2 \lambda_3 = N_1 C_{r1} \theta_1(0) - [N_1 C_{r1} + N_3 C_{r3}] \theta_2(0) + N_3 C_{r3} \theta_3(0) \quad (2.63)$$

$$\left. \frac{d\theta_3}{dX} \right|_{X=0} = \alpha_2 \lambda_1'' + \beta_2 \lambda_2'' + \gamma_2 \lambda_3'' + K_0 (\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) = N_3 \theta_2(0) - [N_0 + N_3] \theta_3(0) \quad (2.64)$$

$$\text{où } \forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \lambda_n'' = \frac{1}{N_3 C_{r3}} \left[\lambda_n^2 + (N_1 C_{r1} + N_3 C_{r3}) \lambda_n + N_1^2 C_{r1} \right] \quad \text{et} \quad K_0 = \frac{-N_1^2 C_{r1}}{N_3 C_{r3}}$$

Fluide 3

$$\theta_3(0) = \alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3 \quad (2.65)$$

$$\left. \frac{d\theta_3}{dX} \right|_{X=0} = \alpha_3 \lambda_1 + \beta_3 \lambda_2 + \gamma_3 \lambda_3 = N_3 \theta_2(0) - [N_0 + N_3] \theta_3(0) \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{d^2\theta_3}{dX^2} + [N_0 + N_3] \frac{d\theta_3}{dX} \right|_{X=0} &= \alpha_3 \lambda_1' + \beta_3 \lambda_2' + \gamma_3 \lambda_3' \\ &= N_3 [N_1 C_{r1} \theta_1(0) - (N_1 C_{r1} + N_3 C_{r3}) \theta_2(0) + N_3 C_{r3} \theta_3(0)] \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\text{où } \forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \lambda_n' = \lambda_n + N_0 + N_3$$

Après combinaison des équations précédentes, les coefficients α_n , β_n et γ_n puis les solutions $\theta_n(X)$ pour $n = 1, 2$ et 3 peuvent être exprimés en fonction de la seule inconnue $\theta_1(0)$:

$$\alpha_n = F_n'' \theta_1(0) + K_n'' \quad (2.68)$$

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \beta_n = F_n' \theta_1(0) + K_n' \quad (2.69)$$

$$\gamma_n = F_n \theta_1(0) + K_n \quad (2.70)$$

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \theta_n(X) = \left[F_n'' e^{\lambda_1 X} + F_n' e^{\lambda_2 X} + F_n e^{\lambda_3 X} \right] \theta_1(0) + \left[K_n'' e^{\lambda_1 X} + K_n' e^{\lambda_2 X} + K_n e^{\lambda_3 X} \right] \quad (2.71)$$

où F_n , F_n' , F_n'' , K_n , K_n' et K_n'' , pour $n = 1, 2$ et 3 , sont des coefficients qui peuvent être exprimés en fonction des paramètres connus N_0 , N_1 , N_3 , C_{r1} , C_{r3} , λ_1 , λ_2 , λ_3 , $\theta_1(1)$, $\theta_2(0)$ et $\theta_3(0)$ (cf. Annexe 3).

En remplaçant $\theta_1(X)$ et $\theta_2(X)$ dans le terme de droite de l'équation (2.49) par leur expression obtenue avec l'équation (2.71) et en intégrant $d\theta_1(X)/dX$ entre 0 et X puis entre 1 et X , on obtient :

$$\begin{aligned} \text{entre 0 et } X \quad \theta_1(X) = & \left[1 + \xi_1 (e^{\lambda_1 X} - 1) + \xi_2 (e^{\lambda_2 X} - 1) + \xi_3 (e^{\lambda_3 X} - 1) \right] \theta_1(0) \\ & + \xi_4 (e^{\lambda_1 X} - 1) + \xi_5 (e^{\lambda_2 X} - 1) + \xi_6 (e^{\lambda_3 X} - 1) \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} \text{entre 1 et } X \quad \theta_1(X) = & \left[\xi_1 (e^{\lambda_1 X} - e^{\lambda_1}) + \xi_2 (e^{\lambda_2 X} - e^{\lambda_2}) + \xi_3 (e^{\lambda_3 X} - e^{\lambda_3}) \right] \theta_1(0) \\ & + \xi_4 (e^{\lambda_1 X} - e^{\lambda_1}) + \xi_5 (e^{\lambda_2 X} - e^{\lambda_2}) + \xi_6 (e^{\lambda_3 X} - e^{\lambda_3}) + \theta_1(1) \end{aligned} \quad (2.73)$$

où $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$ et ξ_6 sont des coefficients qui peuvent être exprimés en fonction des paramètres connus $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, N_1, F_n, F_n', F_n'', K_n, K_n'$ et K_n'' pour $n = 1$ et 2 (cf. Annexe 3).

En égalant les termes de droite des équations (2.72) et (2.73), l'expression de l'inconnue $\theta_1(0)$ peut ensuite être déterminée :

$$\theta_1(0) = \frac{\xi_4 (1 - e^{\lambda_1}) + \xi_5 (1 - e^{\lambda_2}) + \xi_6 (1 - e^{\lambda_3}) + \theta_1(1)}{1 + \xi_1 (e^{\lambda_1} - 1) + \xi_2 (e^{\lambda_2} - 1) + \xi_3 (e^{\lambda_3} - 1)} \quad (2.74)$$

Ainsi, pour $n = 1, 2$ et 3, les triplets de coefficients $(\alpha_n, \beta_n, \gamma_n)$ puis les solutions $\theta_n(X)$ peuvent être obtenus pour toute valeur de X comprise entre 0 et 1. En conséquence, les températures moyennes $T_n(X)$ des trois fluides dans une section d'abscisse X s'écrivent :

$$\forall X \in \{0 \dots 1\} \quad \text{et} \quad \forall n \in \{1, 2, 3\} \quad T_n(X) = T_0 + \Delta T_{in} \theta_n(X) \quad (2.75)$$

Les températures moyennes de sortie des trois fluides sont ensuite directement calculées à partir des expressions suivantes :

$$T_{1 \text{ out}} = T_1(0) = T_0 + \Delta T_{in} \theta_1(0) \quad (2.76)$$

$$T_{2 \text{ out}} = T_2(1) = T_0 + \Delta T_{in} \theta_2(1) \quad (2.77)$$

$$T_{3 \text{ out}} = T_3(1) = T_0 + \Delta T_{in} \theta_3(1) \quad (2.78)$$

Le flux de chaleur $\phi_{30(c)}$ transféré à travers la paroi extérieure non isolée de l'échangeur peut alors être calculé, en intégrant l'expression de $\theta_3(X)$ entre 0 et 1 :

$$\phi_{30(c)} = U_c A_c \Delta T_{in} \int_0^1 \theta_3(X) dX \quad (2.79)$$

$$\phi_{30(c)} = U_c A_c \Delta T_{in} \left[\frac{\alpha_3}{\lambda_1} (e^{\lambda_1} - 1) + \frac{\beta_3}{\lambda_2} (e^{\lambda_2} - 1) + \frac{\gamma_3}{\lambda_3} (e^{\lambda_3} - 1) \right] \quad (2.80)$$

Enfin, pour $n = 1, 2$ et 3 , le flux de chaleur ϕ_n cédé ou récupéré par le fluide n peut être obtenu à l'aide de la relation suivante :

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \phi_n = C_n (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})_n \quad (2.81)$$

➤ Efficacité de l'échange

Pour tout type d'échangeur, l'équation (2.2) donne la définition de l'efficacité de l'échange comme le rapport de la puissance utile récupérée sur la puissance maximale récupérable. Avec les notations adoptées dans cette étude théorique, les expressions de $\phi_{\text{utile récupérée}}$ et de $\phi_{\text{max récupérable}}$ données par les équations (2.22) et (2.23) s'écrivent :

$$\phi_{\text{utile récupérée}} = \phi_2 = C_2 (T_{2\text{out}} - T_{2\text{in}}) \quad (2.82)$$

$$\phi_{\text{max récupérable}} = C_{\min(1; 2)} \Delta T_{\max(1; 2)} + C_{\min(3; 2)} \Delta T_{\max(3; 2)} \quad (2.83)$$

$$\text{où } \forall (i; j) \in \{1; 2; 3\}^2 / i \neq j \quad C_{\min(i; j)} = \min(C_i; C_j)$$

$$\Delta T_{\max(i; j)} = \max(T_{i\text{in}}; T_{j\text{in}}) - \min(T_{i\text{in}}; T_{j\text{in}})$$

Compte tenu des caractéristiques des fluides considérés dans notre étude, on a toujours $C_2 > C_1$, $C_2 > C_3$ et $C_1 > C_3$. La puissance maximum récupérable vaut alors :

$$\phi_{\text{max}} = C_1 (T_{1\text{in}} - T_{2\text{in}}) + C_3 (T_{3\text{in}} - T_{2\text{in}}) \quad (2.84)$$

Ainsi, l'efficacité de l'échange E est obtenue et peut même être ensuite exprimée sous forme adimensionnelle en utilisant les notations introduites précédemment :

$$E = \frac{C_2 (T_{2\text{out}} - T_{2\text{in}})}{C_1 (T_{1\text{in}} - T_{2\text{in}}) + C_3 (T_{3\text{in}} - T_{2\text{in}})} \quad (2.85)$$

$$E = \frac{\theta_2(1) - \theta_2(0)}{C_{r1} + C_{r3}} \quad (2.86)$$

$$E = \frac{\theta_2(1) - \theta_2(0)}{z} \quad (2.87)$$

$$\text{avec } z = C_{\min} / C_{\max} = (C_1 + C_3) / C_2 = C_{r1} + C_{r3} \quad (2.88)$$

Finalement, il vient une expression de l'efficacité de l'échangeur E qui dépend uniquement du paramètre adimensionnel z et du rapport des températures $(T_{2\text{out}} - T_{2\text{in}}) / \Delta T_{\text{in}}$:

$$E = \frac{T_{2\text{out}} - T_{2\text{in}}}{z \Delta T_{\text{in}}} \quad (2.89)$$

2.4.2. Étude paramétrique

➤ Paramètres d'entrée et résultats

Les paramètres d'entrée utilisés pour l'étude paramétrique sont donnés dans le Tableau 2.20. Les diamètres des trois tubes sont respectivement de 80, 180 et 230 mm et la longueur utile de l'échangeur entre les piquages d'air de ventilation est prise égale à 1,5 m. Ces valeurs sont proches des caractéristiques géométriques du prototype de CETP-NI constitué de deux parties qui a été présenté au paragraphe 2.3.4 et dont les performances seront détaillées dans le Chapitre 3.

Les coefficients globaux d'échange thermique U des trois tubes a , b et c sont calculés comme vu précédemment. Pour le cas de l'échangeur parfaitement isolé, la valeur du paramètre U_c est prise égale à zéro. Les deux dernières lignes du Tableau 2.20 donnent les températures de sortie de chaque fluide obtenues tout d'abord avec le modèle de CETP non isolé (NI) développé dans la partie précédente, puis avec le modèle de CETP parfaitement isolé (PI) développé par Ünal [Ünal, 1998].

Tableau 2.20 : Données d'entrée et températures de sortie des modèles de CETP-NI et PI ($L = 1,5$ m)

$L = 1,5$ m		$T_0 = 25^\circ\text{C}$	Fluide 1 FC	Fluide 2 AV	Fluide 3 AC
Données d'entrée	$D_{a, b, c}$	[mm]	80	180	230
	$T_{in\ 1, 2, 3}$	[°C]	180	15	60
	$C_{1, 2, 3}$	[W/K]	10	20	5
Données calculées	$U_{a, b, c}$	[W/(m ² .K)]	5,0	3,2	2,0
CETP-NI	$T_{out\ 1, 2, 3}$	[°C]	153,09	31,6	38,2
CETP-PI [Ünal, 1998]	$T_{out\ 1, 2, 3}$	[°C]	153,13	32,1	45,2

Les calculs réalisés avec le modèle de CETP-NI et PI donnent les distributions de température pour chaque fluide le long de l'échangeur de chaleur, comme le montre le graphique de la Figure 2.44.

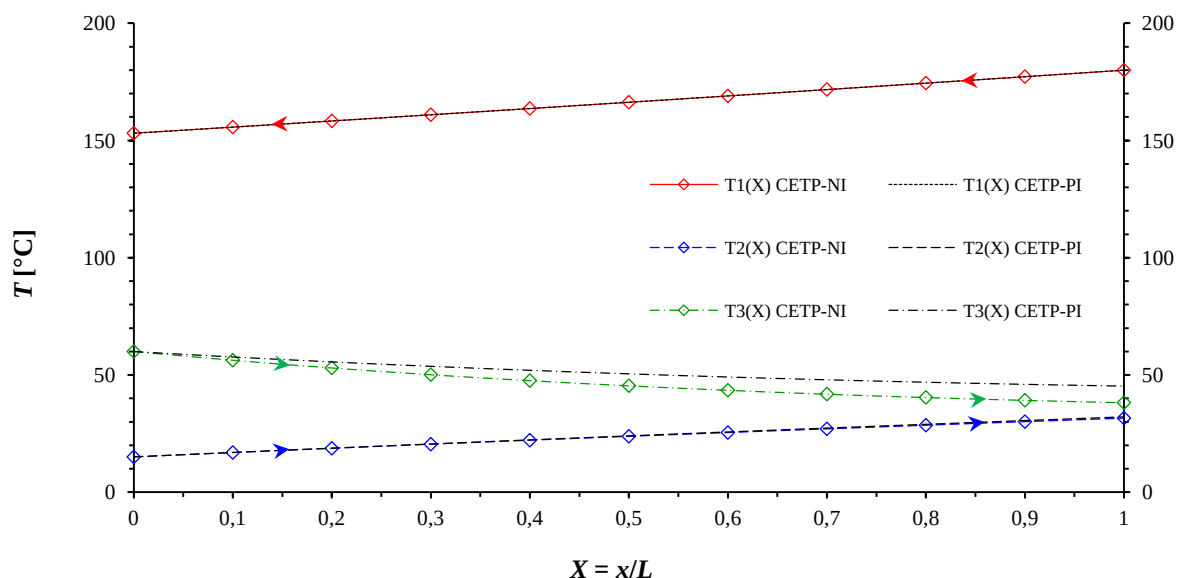


Figure 2.44 : Distribution des températures de chaque fluide le long du CETP-NI et PI ($L = 1,5$ m)

Compte tenu du choix des valeurs des paramètres d'entrée, il semble qu'il n'existe pas de différence notable entre les distributions de température obtenues avec les modèles de CETP-NI et PI, excepté pour le fluide 3, c'est-à-dire l'air de combustion, qui cède une partie de sa chaleur à l'air ambiant extérieur lorsque l'échangeur n'est pas isolé. Cependant, comme le montre les valeurs données dans le Tableau 2.20, les températures de sortie de chaque fluide sont en réalité toutes affectées par la prise en considération des échanges avec l'air ambiant extérieur, même si la différence n'est observée qu'au centième de degré sur les fumées de combustion.

Les trois graphiques de la Figure 2.45 présentent le bilan des flux de chaleur transférés dans le cas où les calculs sont réalisés avec le modèle de CETP-NI original pour lequel $U_c \neq 0$, puis avec le modèle de CETP-NI pour lequel $U_c \approx 0$ de manière à en vérifier la validité par rapport au modèle de CETP-PI développé par Ünal. La partie gauche de chaque graphique représente la somme des flux cédés par les fumées et par l'air de combustion, tandis que la partie droite représente la somme des puissances récupérées à la fois par l'air de ventilation et par l'air ambiant extérieur. Comme attendu, la somme algébrique des puissances transférées ϕ_{FC} , ϕ_{AV} , ϕ_{AC} et ϕ_{OUT} est toujours nulle. Ainsi, l'équilibre des bilans est vérifié pour chaque modèle étudié. Par ailleurs, dans le cas où le coefficient d'échange global du tube extérieur du CETP-NI tend vers zéro, i.e. $U_c = 1.10^{-10} \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ dans le modèle pour éviter d'introduire une division par zéro dans le code de calcul, les résultats obtenus sont strictement identiques à ceux fournis par le modèle de CETP-PI.

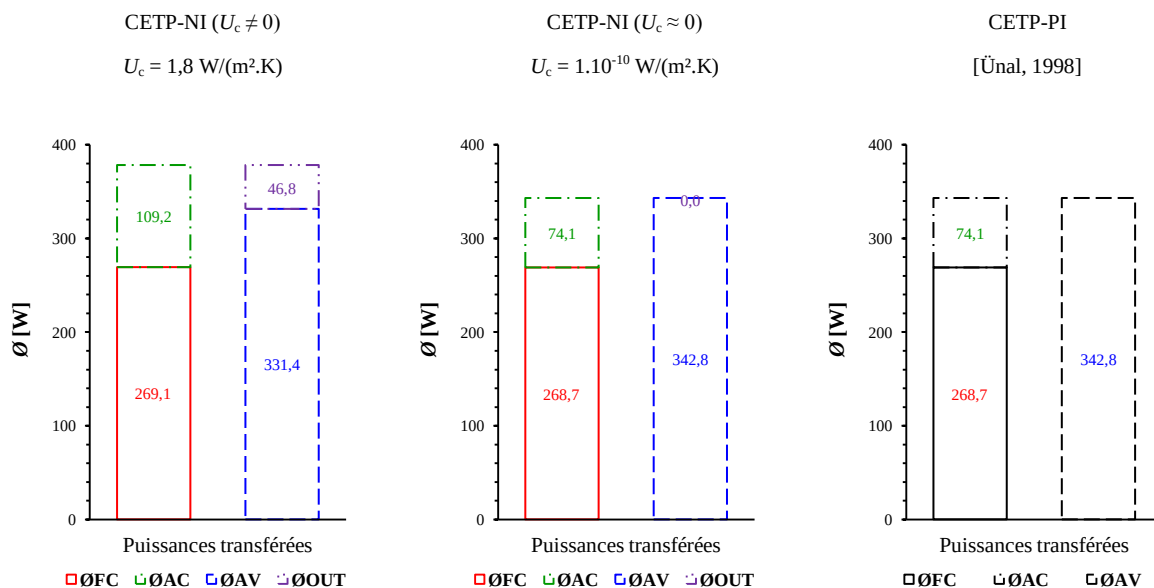


Figure 2.45: Bilan des puissances échangées pour les trois modèles de CETP ($L = 1,5 \text{ m}$)

Bien que les pertes vers l'environnement extérieur représentent environ 12% de la puissance totale transférée avec le modèle de CETP-NI, la puissance récupérée par l'air de ventilation y est seulement inférieure de 3% par rapport à celle récupérée dans le cas du modèle parfaitement isolé. En effet, c'est principalement la quantité de chaleur cédée par l'air de combustion qui est affectée par le fait que le conduit échangeur soit isolé ou non de l'extérieur.

Ainsi, comme l'étude est conduite dans une approche industrielle, l'ajout d'un quatrième tube contenant un matériau isolant autour du conduit échangeur n'apparaît pas être une solution pertinente pour augmenter de façon significative la puissance thermique récupérée par l'air de ventilation.

Par ailleurs, le rendement du poêle à granulés n'est pas forcément dégradé du fait de la diminution de la température de l'air de combustion entre son entrée et sa sortie du conduit échangeur, car il se réchauffe ensuite fortement au contact des fumées de combustion dans le dernier élément de conduit concentrique situé à la base de la cheminée, juste avant d'être admis au niveau du poêle.

Enfin, comme les paramètres d'entrée des modèles de CETP-NI et PI sont identiques et que le niveau de puissance récupérée par l'air de ventilation est assez proche dans les deux cas, il est normal d'obtenir peu de différence entre les performances des deux modèles. Pour un rapport des capacités thermiques $z = 0,75$ et une puissance maximum récupérable qui vaut dans les deux cas 1875 W, les efficacités calculées sont ainsi de 17,7% pour le CETP-NI et de 18,3% pour le CETP-PI.

Dans notre étude, il est intéressant de préciser que les performances du conduit échangeur ne doivent pas être jugées uniquement sur la valeur de l'efficacité de l'échange. En effet, les objectifs recherchés sont avant tout d'obtenir une récupération de chaleur suffisante sur l'air de ventilation de manière à fournir un appoint thermique sur l'air destiné à être insufflé dans les différentes pièces de vie d'une habitation de type BBC, tout en conservant une bonne évacuation des fumées de combustion dont la température ne peut donc pas être abaissée inconsidérément.

➤ Influence d'une augmentation de la longueur de l'échange

Alors que l'équation (2.54) précise que l'expression de la température de chaque fluide le long du CETP-NI s'écrit sous la forme d'une somme de fonctions exponentielles, leur évolution semble être quasi-linéaire sur le graphique de la Figure 2.44.

Toutefois, il est possible de confirmer l'évolution exponentielle de la distribution des températures en augmentant la longueur du conduit échangeur, comme le montre le graphique de la Figure 2.46, qui présente les résultats obtenus avec les modèles de CETP-NI et PI pour les mêmes paramètres d'entrée que précédemment, excepté pour la longueur qui vaut à présent $L = 10$ m.

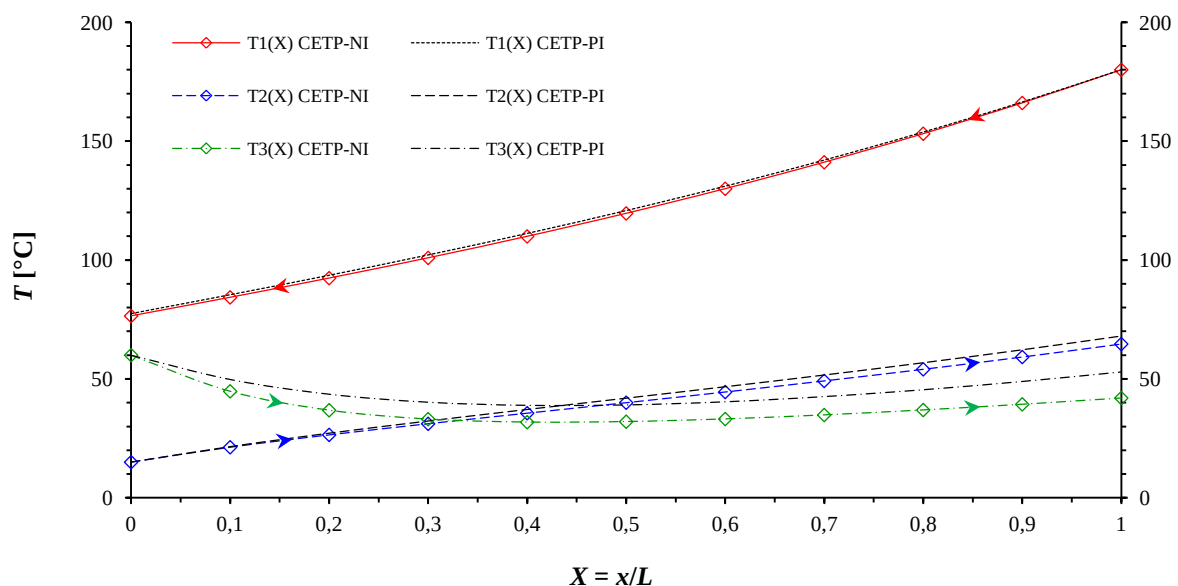


Figure 2.46 : Distribution des températures le long du CETP-NI et PI ($L = 10$ m)

Le graphique de la Figure 2.46 montre qu'à l'abscisse $X = 1$, la température de sortie de l'air de combustion (fluide 3), qui est initialement un des deux fluides chauds, est plus faible que la température de sortie de l'air de ventilation (fluide 2), qui est initialement le fluide froid. Ce phénomène de croisement des températures apparaît aussi bien avec le modèle de CETP-NI qu'avec le modèle de CETP-PI et traduit le fait qu'il existe une inversion du sens des échanges thermiques à partir d'un certain point le long de l'échangeur. Les différences entre les températures de sortie de chaque fluide sont également davantage marquées que précédemment suivant que l'échangeur est isolé ou non, comme le montre les résultats présentés dans le Tableau 2.21.

Tableau 2.21 : Températures de sortie des modèles de CETP-NI et PI ($L = 10$ m)

$L = 10\text{ m}$	$T_0 = 25^{\circ}\text{C}$		Fluide 1	Fluide 2	Fluide 3
			FC	AV	AC
Données calculées	$U_{\text{a, b, c}}$	[W/(m².K)]	5,0	2,5	1,5
CETP-NI	$T_{\text{out } 1, 2, 3}$	[°C]	76,5	64,7	42,0
CETP-PI	$T_{\text{out } 1, 2, 3}$	[°C]	77,5	68,0	53,0

De manière évidente, un conduit échangeur d'une longueur de 10 m n'est pas approprié pour être intégré au système combiné que l'on souhaite développer dans notre étude. Toutefois, il peut être souligné que les pertes vers l'environnement extérieur représentent ici encore environ 12% de la puissance totale cédée à la fois par les fumées et par l'air de combustion. Enfin, comme la puissance maximum récupérable vaut toujours 1875 W, l'efficacité de l'échange atteint 53,0% pour le cas du CETP-NI et 56,6% pour le CETP-PI.

➤ Influence de l'introduction d'ailettes supplémentaires

Dans notre étude, des ailettes sont introduites sur la face externe du tube central pour augmenter la quantité de chaleur transférée depuis les fumées de combustion (fluide 1) vers l'air de ventilation (fluide 2). Ici, seul le modèle de CETP-NI est étudié avec toujours le même jeu de paramètres d'entrée et l'introduction progressive d'ailettes de 0,4 mm d'épaisseur, de 45 mm de largeur et de 1160 mm de longueur. Plusieurs valeurs du paramètre C_2 sont également considérées de manière à traduire les variations possibles du débit d'air de ventilation au sein du conduit échangeur.

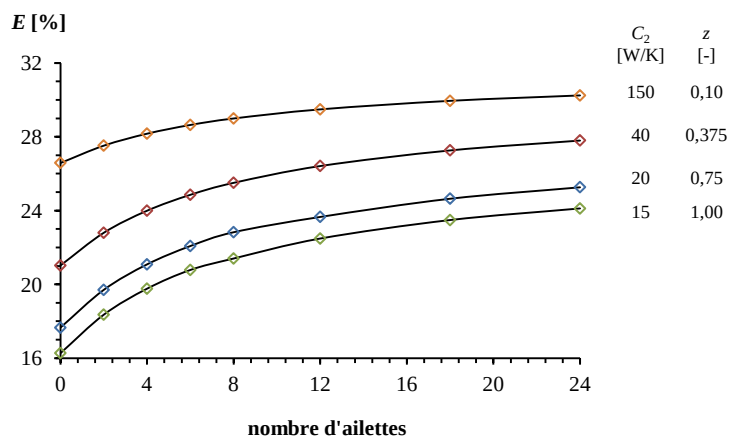


Figure 2.47: Efficacité de l'échange du CETP-NI en fonction du nombre d'ailettes et du paramètre z

Comme attendu, le graphique de la Figure 2.47 montre que l'ajout d'ailettes permet d'augmenter l'efficacité de l'échange. Toutefois, on observe que l'évolution est moins marquée lorsqu'une dizaine d'ailettes a déjà été introduite. Ainsi, le choix initial d'introduire 8 ailettes sur la face externe du tube central apparaît être un bon compromis en terme de rentabilité des performances de l'échange par rapport à la complexité et au coût de la réalisation industrielle.

➤ Efficacité de l'échange

En se basant sur les paramètres d'entrée présentés dans le Tableau 2.20, une courte étude paramétrique est menée pour évaluer l'influence des paramètres C_2 , D_b , $T_{2,in}$ et T_0 sur l'efficacité de l'échange au sein du CETP-NI. Les quatre graphiques de la Figure 2.48 donnent ainsi les variations de l'efficacité en fonction d'un des quatre paramètres considérés et du nombre d'unité de transfert (NUT), qui est un paramètre adimensionnel caractérisant l'échange et qui peut être défini comme suit :

$$NUT = \frac{U_a A_a + U_b A_b}{C_1 + C_3} \quad (2.90)$$

Pour l'élaboration de chaque graphique, différentes valeurs de NUT sont obtenues en faisant varier la longueur du conduit échangeur entre 1 et 30 m. Toutefois, dans notre application et avec les paramètres d'entrée initiaux du modèle, la valeur de NUT reste toujours inférieure à 0,5.

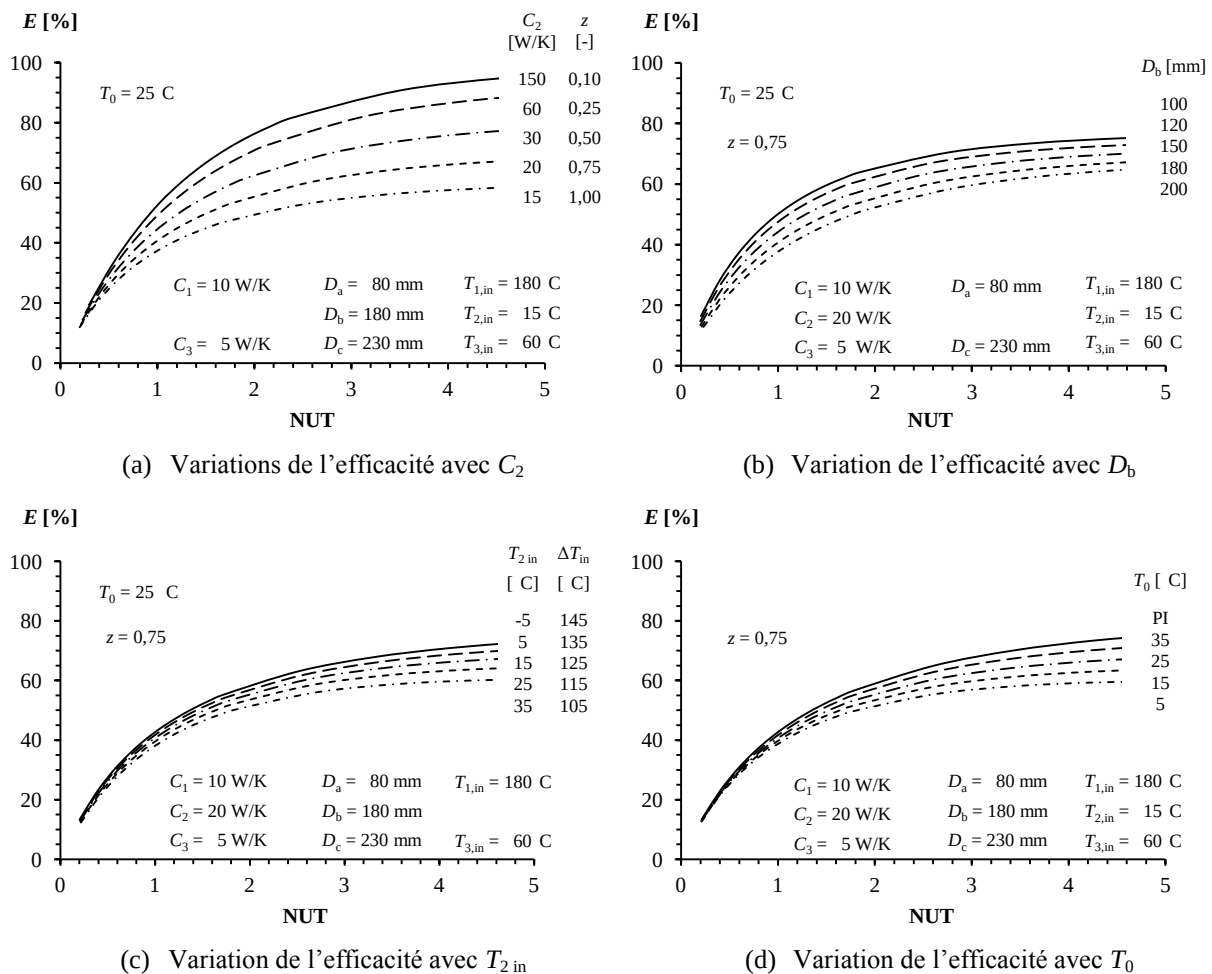


Figure 2.48 : Efficacité de l'échange pour le modèle de CETP-PI

En premier lieu, le graphique (a) de la Figure 2.48 montre que l'efficacité de l'échange augmente lorsque s'élève la capacité thermique C_2 de l'air de ventilation. En effet, lorsque le débit massique du fluide 2 augmente, cela provoque à la fois une diminution du paramètre adimensionnel z définie dans l'équation (2.88) et une augmentation de la valeur des coefficients d'échange par convection $h_{2\text{ int}}$ et $h_{2\text{ ext}}$ dans l'espace annulaire où circule l'air de ventilation. Comme pour les échangeurs de chaleur à deux fluides, l'efficacité de l'échange est minimale pour $z = 1$ et tend vers un maximum lorsque $z \rightarrow 0$. Enfin, on observe que la variation du paramètre C_2 possède une influence assez importante sur la valeur de l'efficacité de l'échange, même pour de faibles valeurs de NUT.

Le graphique (b) de la Figure 2.48 montre ensuite que l'efficacité de l'échange au sein du CETP-NI augmente lorsque le diamètre du deuxième tube D_b diminue. En d'autres termes, la réduction de l'espace annulaire d'écoulement du fluide 2 entraîne une augmentation significative des coefficients d'échange convectif $h_{2\text{ int}}$ et $h_{2\text{ ext}}$ dans l'anneau de passage, dont l'effet bénéfique pour l'amélioration de l'échange de chaleur l'emporte sur l'effet négatif lié à la réduction de la surface d'échange entre le fluide 2 et le fluide 3. Le choix du diamètre D_b possède donc une influence significative sur les performances de l'échangeur, même pour de faibles valeurs de NUT. Cette observation rejoint ainsi les conclusions des travaux réalisés par Ünal, qui a mis en évidence l'importance du choix du rapport des diamètres des trois tubes pour l'amélioration de la performance de l'échange thermique au sein d'un CETP-PI [Ünal, 2001].

Puis, le graphique (c) de la Figure 2.48 montre que l'efficacité de l'échange au sein du CETP-NI augmente lorsque la température d'entrée $T_{2\text{ in}}$ du fluide 2 diminue, c'est-à-dire lorsque le paramètre adimensionnel ΔT_{in} augmente. Cela signifie que pour l'arrangement à contre-co-courant étudié ici, la puissance utile récupérée par l'air de ventilation augmente dans une proportion plus importante que la puissance maximum récupérable sous l'effet d'une diminution de $T_{2\text{ in}}$. Néanmoins, il apparaît que la variation du paramètre $T_{2\text{ in}}$ influence relativement peu l'efficacité de l'échange, surtout pour les faibles valeurs de NUT.

Enfin, lorsque la température T_0 de l'environnement extérieur au CETP-NI s'élève, on observe sur le graphique (d) de la Figure 2.48 que l'efficacité de l'échange s'améliore et qu'elle est bien maximale quand le conduit échangeur est parfaitement isolé (PI). Cependant, comme souligné dans les sections précédentes, la variation de la température extérieure affecte principalement les échanges entre le fluide 3 et l'ambiance. Ainsi, T_0 influence peu l'efficacité de l'échange pour les faibles valeurs de NUT et son impact devient légèrement plus important pour des valeurs de NUT supérieures.

L'analyse des quatre graphiques de la Figure 2.48 permet ainsi de vérifier la cohérence du modèle mathématique présenté dans cette partie et de justifier l'utilisation des équations développées précédemment pour évaluer la performance du modèle de CETP-NI. En outre, l'efficacité de l'échange au sein de ce type d'échangeur à triple paroi se révèle être influencée de manière plus significative par les paramètres C_2 ou D_b que par les paramètres $T_{2\text{ in}}$ ou T_0 .

➤ Influence des pertes vers l'environnement extérieur

Pour le modèle de CETP-NI, il est ensuite intéressant d'évaluer la proportion de chaleur qui est cédée vers l'environnement extérieur ϕ_{OUT} , par rapport à la quantité totale de chaleur cédée ou récupérée, $\phi_{\text{TOT}} = \phi_{\text{AV}} + \phi_{\text{OUT}} = \phi_{\text{FC}} + \phi_{\text{AC}}$, au sein de l'échangeur. Les deux graphiques présentés sur la Figure 2.49 montrent alors que la variation du pourcentage des pertes thermiques vers l'extérieur suit une évolution particulière en fonction de la valeur du NUT.

De manière évidente, le ratio ϕ_{OUT} / ϕ_{TOT} est toujours nul dans le cas d'une isolation parfaite du conduit échangeur. Ensuite, on observe que suivant la température de l'ambiance extérieure T_0 , prise ici entre -10°C et $+40^\circ\text{C}$, les pertes de chaleur peuvent représenter une part significative du transfert thermique total ayant lieu au sein du CETP-NI.

Pour les paramètres d'entrée d'origine du modèle, le graphique (a) de la Figure 2.49 montre que les pertes vers l'extérieur restent inférieures à 20% lorsque $NUT < 1,5$ et $T_0 > 10^\circ\text{C}$, ce qui représente la majorité des cas qui peuvent être rencontrées dans notre application. En effet, dans le cas du système combiné étudié, le CETP-NI est communément situé juste derrière l'appareil de chauffage dans un local technique dont la température reste supérieure à 15°C car il se trouve dans le volume chauffé. En outre, le graphique (b) de la Figure 2.49 montre que le transfert de chaleur se concentre principalement du côté de l'air de ventilation dès que son débit augmente, avec dans le cas représenté un doublement supposé de la capacité thermique du fluide 2. La perte de chaleur vers l'extérieur reste alors inférieure à 10% de la puissance totale échangée lorsque la température ambiante est d'au moins 20°C . Compte tenu du niveau modéré des pertes de chaleur vers l'extérieur qui peuvent être attendues dans le cas de notre application, l'ajout d'un quatrième tube pour isoler l'ensemble du CETP-NI n'apparaît donc pas justifiée au regard de l'accroissement des coûts de fabrication.

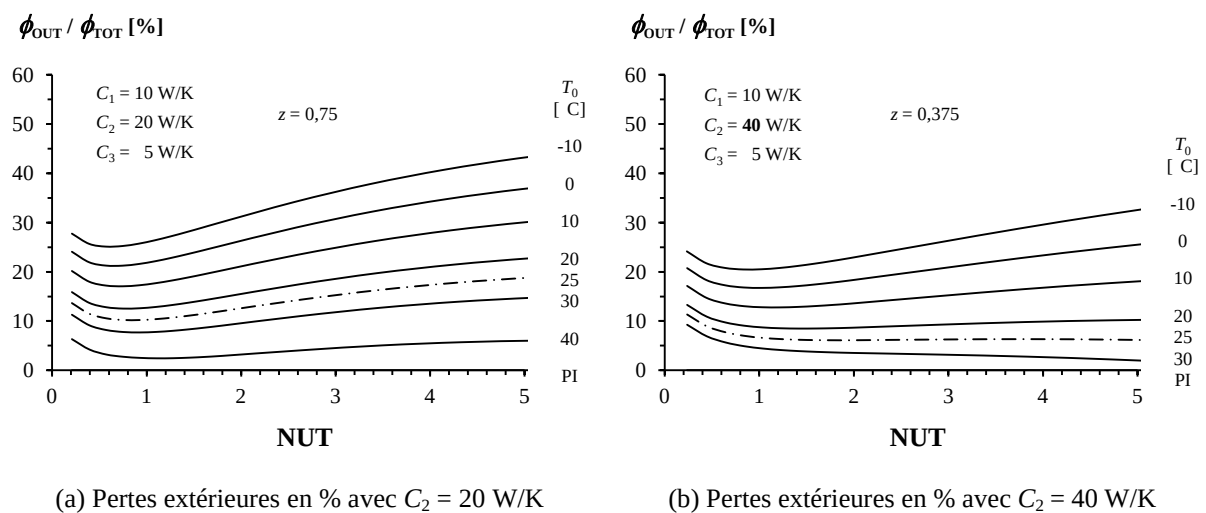


Figure 2.49 : Pourcentage de pertes extérieures pour le modèle de CETP-NI

➤ Synthèse des résultats obtenus avec le modèle de CETP-NI

Au terme de cette partie concernant le développement d'un modèle de conduit échangeur à triple paroi, il peut être rappelé que les solutions analytiques de la distribution des températures des trois fluides circulant au sein de l'échangeur ont été obtenues pour un arrangement d'écoulement à contre-co-courant et en régime permanent. La quantité de chaleur cédée à l'environnement extérieur a également été évaluée. Ensuite, une courte étude paramétrique a permis de mettre en évidence l'évolution exponentielle de la température de chaque fluide dans ce type d'échangeur grâce à l'augmentation de la longueur du CETP-NI. Les calculs de bilan thermique et la comparaison avec un modèle de conduit échangeur à triple paroi parfaitement isolé ont permis de valider le modèle mathématique développé. L'influence sur l'efficacité de l'échange de l'introduction d'ailettes au niveau de la surface externe du tube central a également été étudiée, ainsi que celle de plusieurs paramètres, en particulier C_2 et D_b , dont l'importance a été soulignée.

Pour notre application, il apparaît qu'une isolation du CETP-NI n'est pas vraiment nécessaire compte tenu du fait que l'échangeur se trouve dans le volume chauffé. Ainsi, s'il existe des pertes vers l'extérieur, elles contribuent au réchauffement de l'air de l'habitation et impliquent principalement une diminution de la température de l'air de combustion. Ce dernier conserve toutefois la possibilité d'être fortement réchauffé dans le dernier élément de conduit concentrique situé à la base du poêle.

Enfin, l'étude théorique menée dans cette partie pourrait être étendue aux divers arrangements d'écoulement pouvant être rencontrés dans un échangeur de chaleur à triple tube concentrique et les équations développées ici pour qualifier les performances de l'échange pourraient être utilisées pour effectuer des calculs de dimensionnement.

Chapitre 3 :

Essais du système combiné en laboratoire et sur site

Le chapitre 3 est consacré aux réalisations expérimentales conduites sur l'ensemble du système combiné de ventilation et de chauffage au bois. Dans un premier temps, les essais menés en laboratoire avec les deux derniers prototypes de conduit échangeur permettent d'établir les contraintes de mise en œuvre et les performances globales du système combiné. La validation expérimentale du modèle mathématique est ensuite effectuée vérifiant le bon accord entre les valeurs calculées et mesurées des puissances thermiques transférées et de l'efficacité de l'échange au sein du dernier prototype de conduit échangeur à triple paroi. La mesure des échanges thermiques au niveau de l'unité de ventilation double flux et l'analyse de la combustion du poêle à granulés étanche sont également réalisées. Dans un second temps, le système combiné est installé sur site au sein de deux logements de type T5 grâce au partenariat réalisé avec un bailleur social chargé d'une opération de construction de logements à basse consommation d'énergie près de Poitiers. Un troisième logement identique aux deux premiers sert de référence, étant lui aussi équipé d'un poêle à granulés de bois étanche et d'une ventilation mécanique contrôlée double flux à haut rendement, mais dans lequel ces deux systèmes ne sont pas couplés au moyen d'un conduit échangeur. Les performances sur site du système combiné sont ensuite analysées grâce aux relevés des températures dans les différentes pièces de vie et des consommations énergétiques liées au fonctionnement du poêle et de la ventilation. Enfin, l'appropriation de ce type de système par les occupants et l'évaluation de leur ressenti en terme de bien-être dans leur habitation à basse consommation d'énergie sont discutées.

3.1. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION EN LABORATOIRE

Objectif

L'objectif des prochains essais consiste à étudier l'ensemble du système combiné de ventilation et de chauffage au bois, en se plaçant le plus possible dans des conditions semblables aux conditions réelles d'utilisation. Comme cela a été vu au Chapitre 2, il est alors nécessaire de travailler avec un poêle à granulés de bois à combustion étanche, un système de ventilation mécanique contrôlée double flux à haut rendement et les dernières versions du prototype de CETP-NI.

Les différents essais ont donc pour but de vérifier le fonctionnement global du système, tant d'un point de vue aéraulique que thermique, de déterminer les puissances récupérables aux différents modes de fonctionnement du système ainsi que l'efficacité de l'échange, de mesurer la consommation d'énergie des différents éléments actifs du système, d'évaluer les risques liés à l'utilisation d'un tel système, d'anticiper et de lever les freins liés à l'acceptabilité d'un tel système par les occupants et de proposer à nouveau des voies d'optimisation ou d'évolution du système.

Schéma de principe

La Figure 3.1 donne le schéma de principe du système combiné de ventilation et de chauffage au bois associant un poêle à granulés de bois à combustion étanche (PGB-CE), un conduit échangeur à triple paroi non isolé (CETP-NI) et une ventilation mécanique contrôlée double flux à haut rendement (VMC-DF-HR). Les éclaircs jaunes situés au niveau de la VMC-DF et du poêle à granulés indiquent que ces équipements ont besoin d'être alimentés électriquement pour fonctionner.

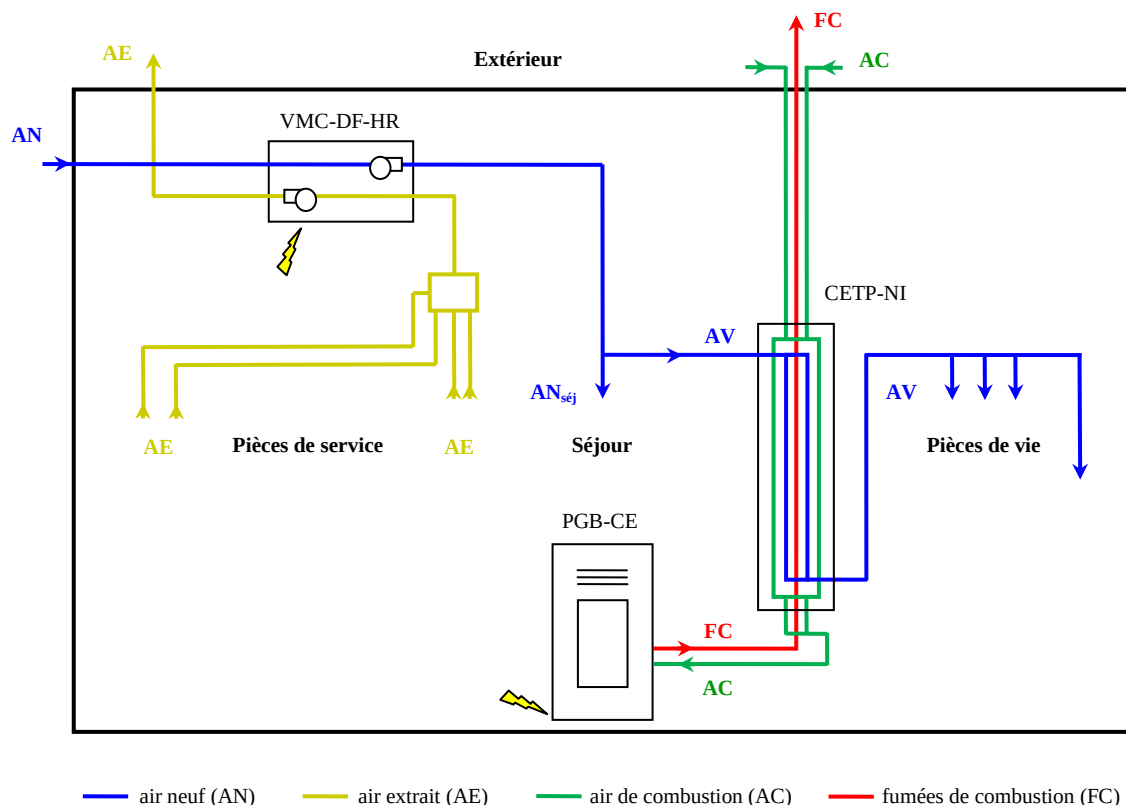


Figure 3.1 : Schéma de principe du système combiné de ventilation et de chauffage au bois

3.1.1. Protocole et méthodologie

➤ Protocole

Lors des essais, le conduit échangeur n'est pas isolé et se situe toujours en partie basse de la cheminée, au plus près de la sortie des fumées de combustion. L'ensemble de la cheminée est placée dans un caisson allant du sol au plafond et jouant le rôle de local technique. Une entrée et une sortie d'air sont aménagées pour assurer la ventilation naturelle du caisson.

Les essais sont menés avec les deux dernières versions des prototypes de CETP-NI, à savoir le prototype n°3, qui est composé d'un élément de conduit unique et pour lequel les piquages d'air de ventilation sont fixes et sont situés du même côté, puis le prototype n°4, qui est une version allongée composée de deux parties avec un emboîtement triple et dont une représentation est donnée sur le schéma de droite de la Figure 2.39. Les caractéristiques de ce dernier prototype sont détaillées dans la partie suivante qui traite des différents composants du banc d'essai.

À l'image des essais précédents, le protocole prévoit la caractérisation des puissances échangées au sein du CETP-NI et l'évaluation de l'efficacité de l'échange pour les trois principaux régimes de fonctionnement du poêle à granulés à combustion étanche et pour les trois allures principales de la VMC-DF. La mesure des puissances échangées au sein de l'unité de ventilation à récupération de chaleur sur l'air extrait est également mise en œuvre pour être à même d'évaluer la performance globale du système combiné. Des mesures visant à qualifier la sécurité du système sont également prévues, notamment avec l'évaluation du taux de CO contenu dans l'air de ventilation en aval du CETP-NI et avant sa distribution au niveau des bouches de soufflage.

À ce stade, il est important de pouvoir distinguer la partie de l'air neuf de ventilation qui circule au sein du CETP-NI et pour laquelle l'abréviation AV utilisée jusqu'à présent est conservée, de la totalité de l'air neuf introduit via le système de VMC-DF et pour laquelle l'abréviation AN est adoptée. L'abréviation AE est quant à elle introduite pour qualifier l'ensemble de l'air extrait par le système de VMC-DF. Enfin, la partie de l'air neuf de ventilation qui est directement soufflé dans le séjour sans passer par le CETP-NI est identifiée par l'abréviation AN_{séj}.

➤ Méthodologie

Acquisition des données

Comme précédemment, les valeurs des vitesses et des températures sont enregistrées toutes les 10 secondes au niveau de la centrale d'acquisition. On suit la dynamique de la source de chaleur et on admet que le régime permanent est atteint lorsque les moyennes glissantes sur 2 minutes des différentes grandeurs mesurées restent constantes pendant 10 minutes. De manière générale, le régime permanent est une nouvelle fois atteint environ 2 heures après l'allumage du poêle.

Réglage des paramètres du poêle à granulés

Les réglages initiaux des paramètres de fonctionnement du poêle étanche sont conservés. Ici encore, les régimes de fonctionnement principaux du poêle à granulés correspondent aux puissances du poêle et aux vitesses du ventilateur minimum P1-V1, intermédiaire P3-V3 et maximum P5-V5. Pour travailler en continu, le thermostat d'ambiance est systématiquement désamorcé (T : High).

Réglage et équilibrage de la VMC double flux

Les débits d'air de ventilation utilisés correspondent aux 3 allures de la VMC-DF. Ces débits dépendent des réglages des potentiomètres I et III situés sur le côté de l'appareil et doivent permettre de respecter les obligations réglementaires qui garantissent le renouvellement et la qualité de l'air intérieur dans l'habitat individuel, conformément à l'arrêté du 24 mars 1982 [Arrêté_Vent, 1982].

On décide de régler et d'équilibrer la ventilation de manière à fournir les débits exigés par la réglementation dans une habitation de type T5, comme cela sera le cas lors de l'installation du système combiné sur site réel (cf. partie 3.3). La surface de l'habitation est d'environ 105 m², soit un volume d'environ 260 m³ en considérant une hauteur moyenne sous plafond de 2,5 m.

Le Tableau 3.1 donne les valeurs des débits en m³/h qui sont finalement retenus lors de l'installation du système combiné en laboratoire. Les valeurs en rouge correspondent aux exigences définies par l'arrêté de 1982 qui concernent les obligations de débits extraits. Les valeurs en vert et en bleu sont définies de manière à respecter l'équilibre des débits insufflés et extraits.

Tableau 3.1 : Valeurs des débits d'air de ventilation retenus pour l'installation en laboratoire

Allures		Réduite (absence)	Normale (présence)	Élevée (activité)
Débits extraits [m ³ /h]	Cuisine	35	45	135
	SdB + WC	15	20	30
	SdB	15	15	15
	WC	15	15	15
Débits insufflés [m ³ /h]	Séjour	20	25	75
	Chambre 1	15	20	30
	Chambre 2	15	20	30
	Chambre 3	15	20	30
	Chambre 4	15	20	30
Total		80 (25)	105	195
Renouvellement d'air [vol/h]		0,3 (0,1)	0,4	> 0,7

Les valeurs choisies sont obtenues en positionnant le potentiomètre I à 1/3 de sa course maximale et le potentiomètre III au minimum. Le débit d'air de ventilation qui circule dans le conduit échangeur correspond à l'ensemble des débits soufflés dans les 4 chambres, soit un total d'environ 60 m³/h pour l'allure réduite, de 80 m³/h pour l'allure normale et de 120 m³/h pour l'allure élevée.

➤ **Paramètres mesurés et calculés**Puissance / Efficacité

La puissance ϕ_i cédée ou récupérée par le fluide i et l'efficacité de l'échange E entre les trois fluides en présence dans le CETP-NI, sont évaluées de la même façon qu'au paragraphe 2.2.1 d'après les expressions données par les équations (2.19) à (2.22). Pour l'expression des puissances échangées et de l'efficacité de l'échange au sein de la VMC-DF, les équations (2.1) à (2.5) sont utilisées.

Le bilan de puissance sur l'ensemble du CETP-NI peut s'écrire sous la forme d'une égalité entre les puissances cédées à la fois par les fumées ϕ_{FC} et par l'air de combustion ϕ_{AC} d'une part et les puissances récupérées à la fois par la partie de l'air neuf de ventilation circulant dans le conduit échangeur ϕ_{AV} et par l'environnement extérieur ϕ_{OUT} d'autre part. Le bilan de puissance s'écrit alors :

$$\phi_{FC} + \phi_{AC} = \phi_{AV} + \phi_{OUT} \quad (3.1)$$

Caractéristique globale de l'échange

Lors des essais sur le système combiné en laboratoire, la caractéristique globale de l'échange UA est évaluée de façon théorique. Elle est ensuite utilisée dans le modèle de CETP-NI. Les coefficients ρ et c_p de l'air et des fumées sont déterminés de la même façon qu'au paragraphe 2.2.1. Le traitement des données est également semblable.

Rendement du poêle à granulés de bois

Le rendement de combustion du poêle à granulés de bois est déterminé aux différentes puissances de fonctionnement à partir de la mesure des taux de CO et de CO₂ dans les fumées et de la différence de température entre les fumées et l'air de combustion au niveau des buses situées à l'arrière de l'appareil, selon la norme NF EN 14785 [AFNOR, 2006]. Le rendement de combustion, noté η et exprimé en %, s'obtient ainsi à partir de l'expression :

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad (3.2)$$

Les pertes par chaleur sensible (ou spécifique) des fumées q_a sont calculées à l'aide de l'expression :

$$q_a = \frac{100}{Hu} (T_{FC, buse} - T_{AC, buse}) \left[c_{pFC} \frac{(C - C_r)}{0,536 \cdot [\sigma(CO) + \sigma(CO_2)]} + \frac{c_{pH_2O} \cdot 1,92 \cdot (9H + W)}{100} \right] \quad (3.3)$$

Les pertes par chaleur latente des fumées q_b sont définies par l'expression :

$$q_b = \frac{100}{Hu} \frac{12644 \cdot \sigma(CO) (C - C_r)}{53,6 \cdot [\sigma(CO) + \sigma(CO_2)]} \quad (3.4)$$

Les pertes par imbrulés solides q_r sont forfaitairement de 0,2% dans le cas des granulés de bois.

Les taux de CO et de CO₂, notés $\sigma(CO)$ et $\sigma(CO_2)$ sont exprimés ici tous les deux en % et les valeurs propres au combustible d'essai suivantes sont adoptées :

$Hu = 19782$ kJ/kg	le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible d'essai
$W = 5,1\%$	le taux d'humidité du combustible d'essai
$H = 6,24\%$	la teneur en hydrogène du combustible d'essai
$C = 47,7\%$	la teneur en carbone du combustible d'essai
$C_r = 0,12\%$	la teneur en carbone des résidus passant à travers la grille

où les paramètres c_{pFC} et c_{pH_2O} dépendent des paramètres $T_{FC, buse}$ et du taux de CO₂.

3.1.2. Principaux composants du banc d'essai

➤ Le poêle à granulés de bois à combustion étanche (PGB-CE)

Bien que la demande soit forte du côté du marché, lors de la préparation des essais pendant l'hiver 2009, seuls deux constructeurs de poêle à granulés de bois possèdent une gamme d'appareils dont le cycle de combustion est reconnu étanche et qui sont visés par un avis technique (ATec) du CSTB, comme cela est précisé dans le Tableau 3.2 :

Tableau 3.2 : Poêles à granulés de bois à cycle de combustion étanche visés par un ATec du CSTB

Fabricant	Gamme	N° Avis Technique	Vue
PALAZZETTI	ELENA	14/08-1276	
HARMAN	COGRA	14/08-1312	

Le laboratoire CERIC testant régulièrement des appareils de chauffage au bois, il est possible de mener nos essais sur le poêle à granulés à combustion étanche ELENA du fabricant PALAZZETTI, visé par l'avis technique 14/08-1276 [CSTB_ATec, 2008]. Le seul appareil existant dans la gamme du constructeur lors de nos essais en laboratoire sur le système combiné est le modèle ELENA NEW, dont la puissance nominale vaut 9 kW. De manière évidente, cette puissance nominale s'avère être trop importante par rapport aux faibles besoins des habitations de type BBC.

Toutefois, l'appareil possède différents régimes de puissance pouvant s'abaisser jusqu'à 3 kW ce qui est mieux adapté aux exigences de la plupart des BBC. En pratique, l'appareil peut être limité en puissance grâce à la fonction ECONOMY qui permet de fixer le niveau de la puissance maximum de travail en mode automatique. La fonction STAND-BY permet également, pendant la phase de fonctionnement, d'éteindre le poêle quand la température ambiante programmée (SET T.AMB.) est atteinte et de le remettre en fonctionnement lorsque la température ambiante atteint un niveau minimum programmé (TEMP. START). Le réglage des paramètres du poêle s'effectue au moyen d'un panneau de commande analogique situé sur le haut de l'appareil. L'utilisateur peut ainsi contrôler et visualiser en permanence les 3 paramètres suivants :

- Puissance du poêle : P de 1 à 5 ou A (Automatique)
- Vitesse du ventilateur : V de 1 à 5 ou A (Automatique)
- Température ambiante programmée : T de 10 à 40°C ou H (High : sans thermostat)

Lors des essais, aucune température ambiante de consigne n'est programmée et le thermostat est désamorcé (T ≡ High). En revanche, pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil, les réglages de la puissance de chauffage et de la vitesse du ventilateur soufflant l'air chaud en face avant sont toujours pris identiques. Ainsi, le régime minimum du poêle est identifié par la consigne P1-V1, le régime intermédiaire par P3-V3 et le régime maximum par P5-V5.

Comme c'est le cas pour de nombreux poêles à granulés, le conduit de cheminée raccordé à l'appareil est légèrement désaxé par rapport au centre de la face arrière. Sur la gamme ELENA, la buse d'évacuation des fumées est située sur le côté gauche en bas de l'appareil et l'admission de l'air de combustion s'effectue par un orifice situé plus bas à droite, comme le montre le schéma de la Figure 3.2. Le diamètre des deux buses est de 80 mm.



Figure 3.2 : Vues et schéma du poêle à granulés à cycle de combustion étanche ELENA NEW

Le Tableau 3.3 présente ensuite les principales caractéristiques techniques données par le constructeur pour les poêles à granulés à cycle de combustion étanche ELENA NEW et ELENA MINI. Indisponible au moment des essais sur le système combiné en laboratoire, ce dernier modèle est commercialisé en France depuis avril 2010. Il affiche des caractéristiques semblables au modèle NEW, mais présente une puissance nominale abaissée à 6 kW qui lui permet de mieux répondre aux faibles besoins des habitations de type BBC. De manière générale, les appareils de la gamme ELENA présentent une capacité de stockage maximale de 18 kg en granulés, une puissance électrique maximum consommée au démarrage et en fonctionnement de 400 W et 110 W respectivement, pour un poids à vide de l'appareil de 150 kg dans sa version acier.

Tableau 3.3 : Caractéristiques techniques des poêles ELENA NEW et MINI (données constructeur)

Caractéristiques techniques	Unités	Min (P1-V1)	Max (P5-V5)	
			NEW	MINI
Puissance thermique	[kW]	3	9,3	6,3
Efficacité	[%]	94,5	91	92,5
Température des fumées	[°C]	62	157	115
Débit des fumées	[g/s]	3,1	5,3	4,3
Consommation de combustible	[kg/h]	0,6	2,1	1,4
Émissions de CO (13% d'O ₂)	[mg/Nm ³]	326	65	65
Émissions de poussières	[mg/Nm ³]	15	15	15

Un soin particulier a été apporté lors de la réalisation des poêles à granulés de la gamme ELENA pour rendre leur circuit de combustion étanche. Naturellement, cette caractéristique favorise leur installation dans les habitations de type BBC, caractérisées notamment par leur forte étanchéité à l'air. En effet, ces appareils restent indépendants des conditions qui règnent dans l'ambiance, mais surtout leur fonctionnement ne perturbe pas le système de ventilation et n'entraîne pas de risque de refoulement des fumées dans l'habitation.

Pour atteindre un bon niveau d'étanchéité du circuit de combustion, la société PALAZZETTI a tout d'abord traqué la moindre fuite au niveau des soudures entre les éléments de la chambre de combustion et ceux du dispositif d'amenée d'air de combustion secondaire au niveau de la vitre, puis elle s'est attachée à rendre étanche la trémie ainsi que le dispositif d'alimentation en granulés, dont une représentation est donnée sur la Figure 3.3.

Le canal de chute des granulés de bois est alimenté par une écluse rotative, appelée aussi vis étoile ou encore vis castor, car elle a la particularité de pouvoir couper les granulés trop longs. Un avantage conséquent de ce système d'alimentation tient au fait qu'il ne se bloque pas avec les amas de sciures, comme c'est parfois le cas avec les vis sans fin. Ici, les résidus en fond de trémie sont entraînés vers le brûleur, offrant ainsi une plus grande souplesse d'utilisation du combustible.

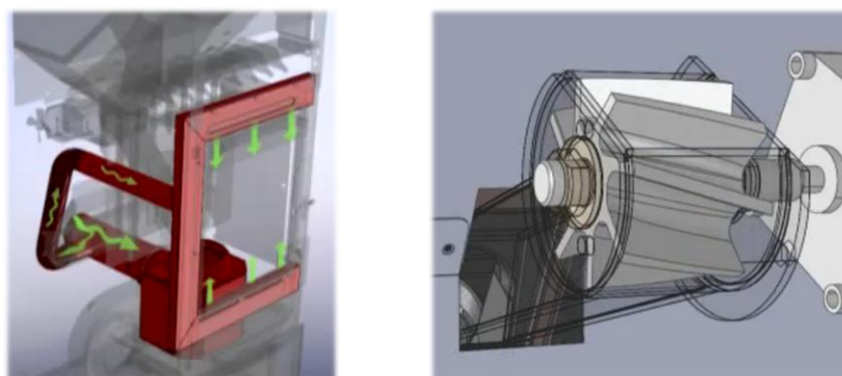


Figure 3.3 : Vues du circuit d'air de combustion et de l'écluse rotative des poêles ELENA

Ce type d'appareils à cycle de combustion étanche permet d'être en conformité avec le décret du 27 novembre 2008 relatif à la prévention des intoxications par le monoxyde de carbone dans les locaux à usage d'habitation neufs et existants et instaurant une sanction pénale en cas de non respect du dispositif de prévention [Décret_CO, 2008], ainsi qu'avec l'arrêté CO du 23 février 2009 qui précise les modalités d'application du dispositif en termes d'exigences techniques de ventilation des locaux, d'évacuation des produits de combustion, ainsi que d'installation et d'entretien des appareils de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire [Arrêté_CO, 2009].

Le Tableau 3.4 présente les résultats des tests d'étanchéité réalisés au laboratoire CERIC sur l'appareil ELENA NEW. Le secteur étant actuellement dans l'attente de la publication d'une norme spécifique relative aux conditions d'essai pour l'évaluation du niveau d'étanchéité des poêles à granulés de bois, les débits de fuite sont généralement mesurés pour une mise en pression de la chambre de combustion comprise entre 10 Pa (CEN/TC 295)⁴⁰ et 50 Pa (NF EN 613)⁴¹. Au vu des résultats, l'appareil ELENA NEW possède un circuit de combustion particulièrement étanche.

Tableau 3.4 : Résultats du test d'étanchéité sur le poêle ELENA NEW du fabricant PALAZZETTI

Norme d'essai	Pression d'essai [Pa]	Débit de fuite [l/h]	Limite normative de fuite [l/h]
NF EN 613 : 2000	50	600	2325
CEN/TC 295	10	160	2400

⁴⁰ CEN/TC 295: Fireplaces fired by solid fuel – Roomsealed appliances

⁴¹ NF EN 613 : 2000 : Appareils de chauffage indépendants à convection utilisant les combustibles gazeux

➤ Le conduit échangeur à triple paroi non isolé (CETP-NI)

Le Tableau 3.5 donne les principales informations concernant le prototype n°4 de CETP-NI, composé de deux parties, comme illustré sur le schéma de droite de la Figure 2.39. Un soin particulier est apporté au niveau de l'assemblage des deux parties, avec la mise en place de joints pour améliorer l'étanchéité entre les trois zones d'écoulement des fluides.

Tableau 3.5 : Vue, plan et caractéristiques du prototype n°4 de conduit échangeur à triple paroi

Photographies et plan en coupe longitudinale	Caractéristiques géométriques
	Diamètre intérieur : 80 mm
	Diamètre intermédiaire : 180 mm
	Diamètre extérieur : 230 mm
	Hauteur totale : 1945 mm
	Hauteur utile : 1650 mm
	Hauteur ailetée : 1280 mm
	Surface F (int) : 0,547 m ²
	Surface AV (int/ext) : 1,52 m ² / 0,98 m ²
	Surface AC (int/ext) : 0,98 m ² / 1,60 m ²

Le Tableau 3.6 donne les résultats des tests d'étanchéité (Figure 3.4) réalisés sur 2 exemplaires du prototype n°4 de CETP-NI au niveau des différentes zones de passage des fluides. Le débit de fuite mesuré correspond au débit d'air comprimé qui doit être fourni pour maintenir une différence de pression de 200 Pa entre l'entrée et la sortie de la zone testée. Les débits de fuite dans les zones de passage des fumées et de l'air de ventilation sont très faibles, ce qui traduit la très bonne étanchéité des deux premiers tubes concentriques.

Tableau 3.6 : Débits de fuite sous 200 Pa du prototype n°4 de conduit échangeur à triple paroi

Débit de fuite sous 200 Pa	Unités	Fumées de combustion	Air de ventilation	Air de combustion
Premier prototype n°4	[l/h]	0,7	1,8	40,0
Second prototype n°4	[l/h]	0,5	0,7	33,3

Les débits de fuite mesurés au niveau de la zone de passage de l'air de combustion sont plus importants, car la paroi extérieure du conduit échangeur est composée de plusieurs parties soudées entre elles. Les valeurs obtenues restent néanmoins tout à fait acceptables, car dans les conditions réelles d'utilisation, la dépression dans l'espace de passage de l'air de combustion n'est que d'une dizaine de Pascal et il faut rappeler que le système fonctionne en pulsion, ce qui n'entraîne aucun risque de passage des fumées ou de l'air de combustion dans l'air de ventilation.



Figure 3.4 : Vue du test d'étanchéité mené au CERIC sur le prototype n°4 de CETP-NI

La Figure 3.5 présente les résultats expérimentaux du test de pertes de charge sur le prototype n°4 de CETP-NI. L'essai a été réalisé dans le laboratoire de recherche et développement de l'industriel VIM à Azay le Brûlé (79). Il consiste à mesurer la différence de pression entre les piquages d'entrée et de sortie du prototype en fonction du débit de l'air de ventilation (cf. Figure 2.9).

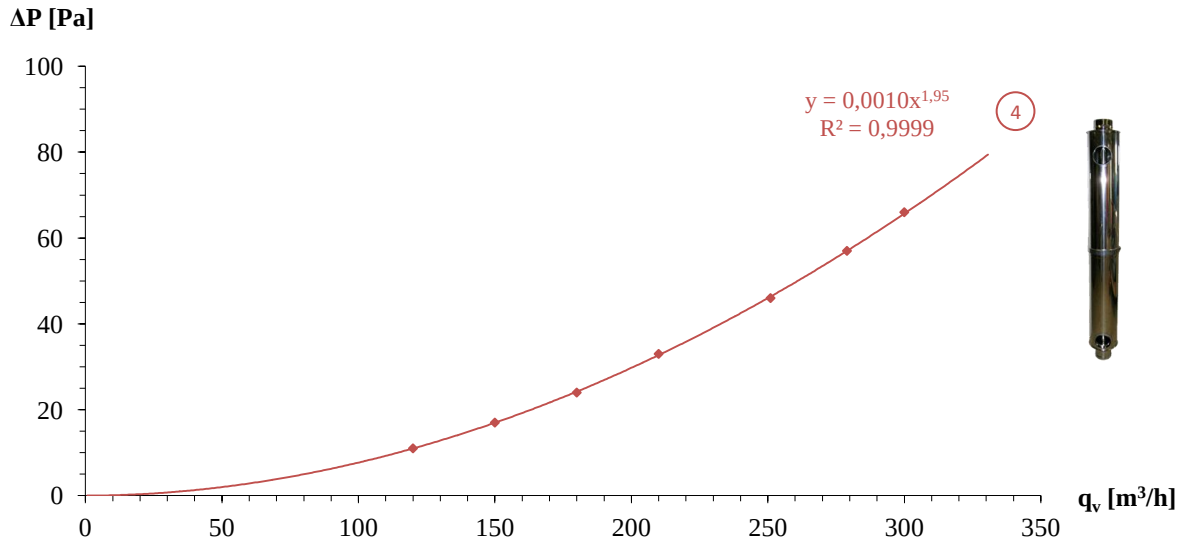


Figure 3.5 : Courbe de pertes de charge sur l'air de ventilation du prototype n°4 de CETP-NI

La Figure 3.6 permet de comparer les pertes de charge introduites sur l'air de ventilation par les différents prototypes réalisés. Ainsi, bien que le prototype n°4 soit plus long, les pertes de charge qu'il introduit sont semblables à celles introduites par les prototypes n°2 et n°3. La raison tient au fait que les pertes de charges linéaires augmentent peu et restent largement dominées par les pertes de charges singulières dues aux piquages d'entrée et de sortie d'air de ventilation.

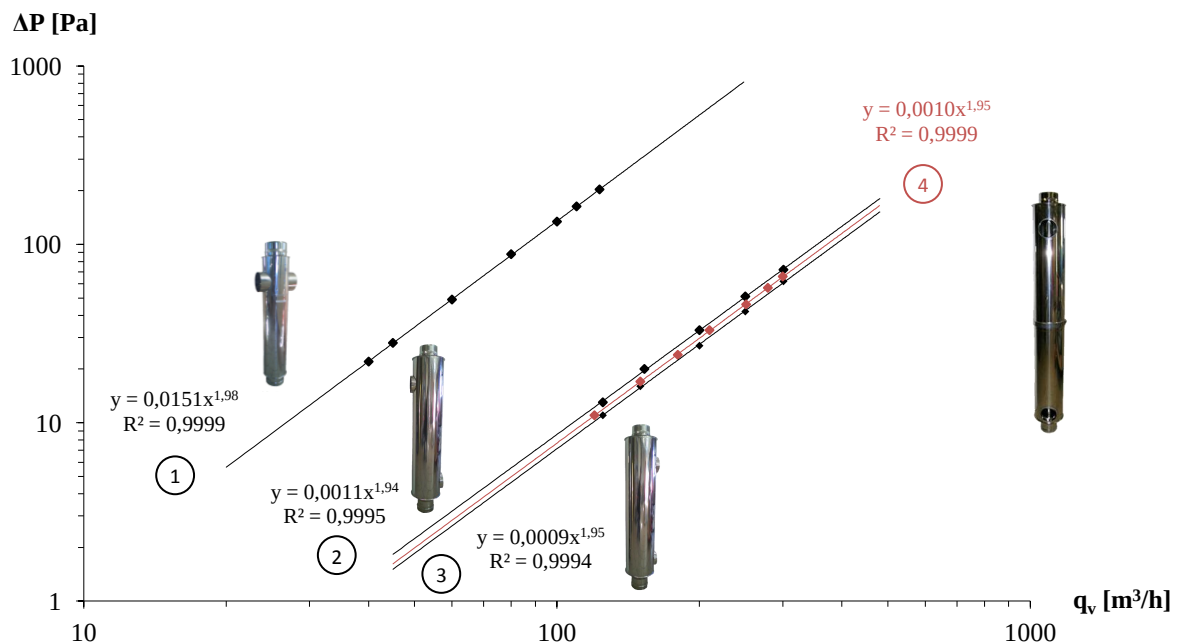


Figure 3.6 : Courbes de pertes de charge sur l'air de ventilation pour les 4 prototypes de CETP-NI

➤ La VMC double flux à haut rendement (VMC-DF-HR)

La VMC double flux utilisée lors des essais en laboratoire est le modèle AKOR HR de chez UNELVENT. Il s'agit d'un appareil à haut rendement et à faible consommation qui est destiné aux habitations domestiques. C'est également ce modèle qui a été retenu pour équiper les logements où seront menés les prochains essais sur site réel. La Figure 3.7 donne une vue de l'appareil et détaille son fonctionnement en mode normal et dans le cas où le by-pass est utilisé.

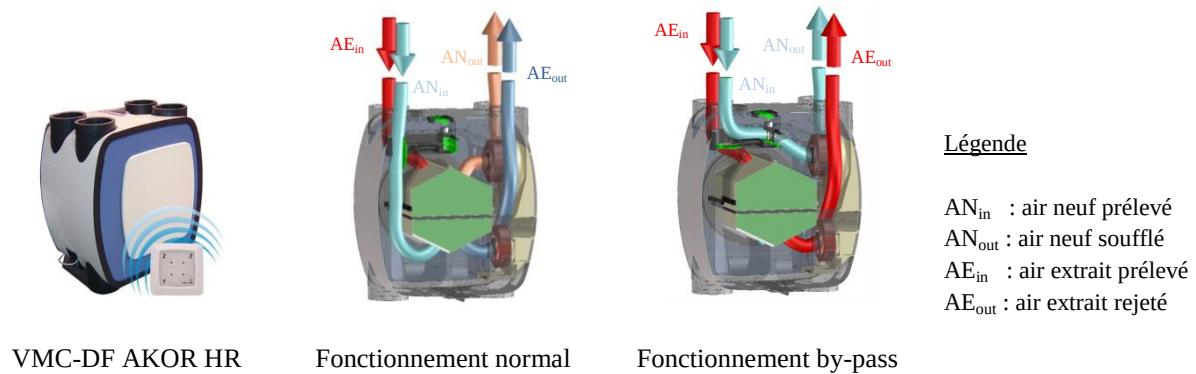


Figure 3.7 : Vue de la VMC double flux AKOR HR et détails de fonctionnement

L'unité centrale de ventilation est un appareil monobloc isolé en polystyrène de 84,8 cm en hauteur, de 73 cm en largeur et de 47,9 cm en profondeur. Son poids est de 25 kg. Les 4 piquages de raccordement sont en diamètre 150 mm. L'admission de l'air neuf et l'évacuation de l'air extrait s'effectuent par 2 piquages qui sont situés en partie haute. Les 2 autres piquages, qui servent au soufflage de l'air neuf et à la reprise de l'air extrait, peuvent être situés en partie haute ou en partie basse selon les besoins de raccordement et l'emplacement de l'unité dans le logement. La calibration des débits extraits de la cuisine, de la salle de bain et des WC s'effectue grâce à un caisson de reprise. Le soufflage peut s'effectuer au moyen d'un caisson de répartition ou avec des piquages de dérivation.

Cette VMC-DF est équipée d'un échangeur à contre courant et à haut rendement (> 80%), composé de plaques en polymères qui permettent de séparer les flux d'air neuf et d'air extrait tout en transférant efficacement les calories. L'appareil possède également des filtres de classe G3, au niveau du soufflage et de la reprise, capables de retenir divers éléments tels que des insectes, des fibres textiles, des cheveux, du sable, des cendres, du pollen... Chacun des 2 ventilateurs est entraîné par un moteur à courant continu monophasé alimenté en 230V-50 Hz et dont la puissance maximum consommée est de 195 W.

Il existe 3 allures de fonctionnement : réduite (absence), normale (occupation) et élevée (activité). Une commande filaire ou radio permet d'adapter le renouvellement d'air à l'activité dans l'habitation. La vitesse élevée peut être temporisée sur une période de 10, 20 ou 30 minutes. Un by-pass et un clapet de prise d'air ambiant automatiques sont intégrés dans l'appareil pour garantir le confort d'été et la mise hors gel de l'unité avec une température d'entrée d'air minimum maintenue à 2°C. L'appareil dispose également en partie basse d'une purge d'évacuation des condensats de diamètre 40 mm. Le réglage des allures de fonctionnement de la VMC s'effectue au moyen de 2 potentiomètres, notés I et III. Les potentiomètres I et III permettent respectivement le réglage de l'allure réduite et de l'allure élevée. L'allure normale est ensuite définie automatiquement en fonction des réglages effectués avec les potentiomètres I et III.

➤ Le conduit de cheminée

Le conduit de cheminée est composé d'un té de raccordement de 175 mm, d'un élément droit de prise d'air de combustion de 150 mm qui joue aussi le rôle d'un élément droit de prise de mesure de température (EDPA/EDPM-T), du conduit échangeur à triple paroi qui est ainsi placé au plus près du poêle, d'un élément de prise de mesure de température et de vitesse (EDPM-T&V) de 250 mm, de trois éléments droits de 1 m, d'un élément droit de 250 mm et d'un terminal de toiture de 250 mm. Ces différents éléments, à l'exception du prototype n°4, ont déjà été présentés dans le Tableau 2.7. Lors de ces essais, la hauteur totale du conduit de cheminée vaut environ 5,8 m. La Figure 3.8 permet de visualiser les deux EDPM situés juste au dessous et au dessus du conduit échangeur.

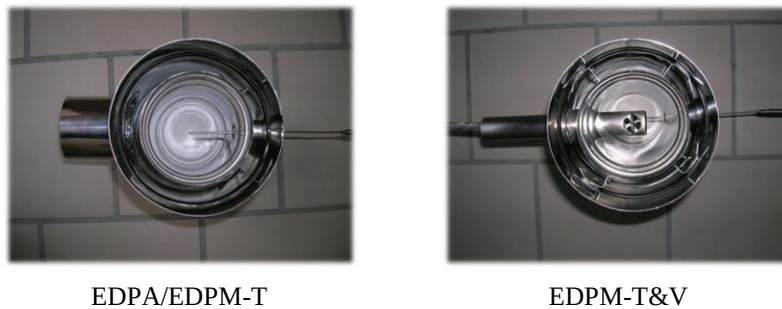


Figure 3.8 : Vue des deux éléments de prise de mesure instrumentés sur les fumées

Le conduit de cheminée étanche et le conduit échangeur sont placés dans une gaine technique allant du sol jusqu'au plafond. Située derrière le poêle, cette gaine technique est ventilée naturellement par des prises d'air situées en partie basse et des ouvertures en partie haute. L'espace situé entre le conduit de cheminée et les parois de la gaine technique n'est pas isolé.

➤ Le réseau de ventilation

L'ensemble du réseau de ventilation est constitué de conduites métalliques à parois intérieures lisses pour limiter au maximum les pertes de charge. La majeure partie du réseau est constituée de tubes rigides sauf au niveau des raccordements aux piquages extérieurs et au niveau du piquage haut du conduit échangeur où des tubes flexibles sont utilisés. La Figure 3.9 présente des photographies du réseau de ventilation réalisé au CERIC lors des essais en laboratoire sur le système combiné.

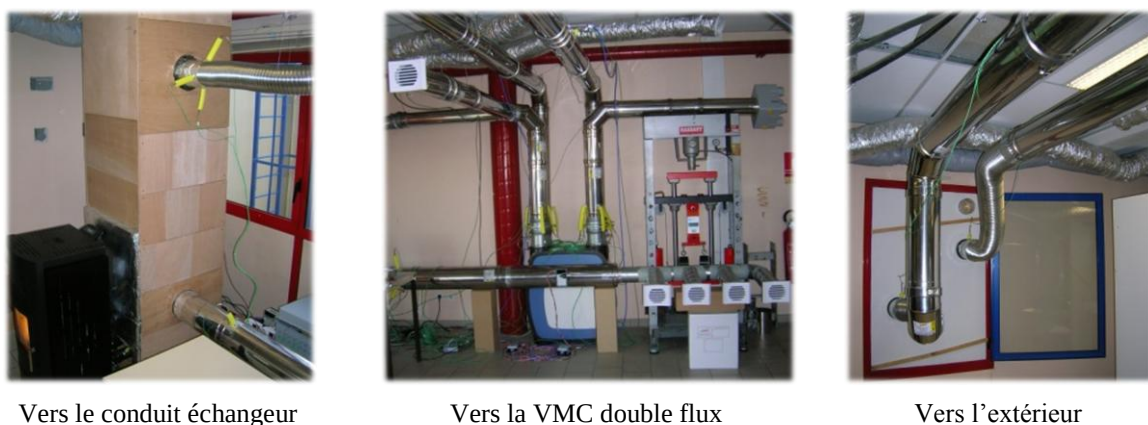


Figure 3.9 : Vues du réseau de ventilation lors des essais en laboratoire

3.1.3. Métrologie et instrumentation

➤ Mesure de la vitesse

Comme pour les essais précédents et malgré une certaine sensibilité à l'encrassement qui nécessite son nettoyage régulier, le capteur de vitesse à moulinet HÖNTZSCH en *acier inox* est utilisé sur les fumées. Le capteur à moulinet *en aluminium* est quant à lui positionné en aval du CETP-NI pour mesurer la vitesse de l'air de ventilation ayant circulé dans le conduit échangeur. Un transmetteur à fil chaud TSI est également utilisé pour évaluer la vitesse puis le débit de l'air directement soufflée dans la pièce où est installé le poêle. Les caractéristiques de ces différents capteurs ont été présentées dans la partie 2.2.3.

On dispose également de trois nouveaux capteurs de vitesse à film chaud HÖNTZSCH, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3.7. Ces capteurs sont utilisés pour mesurer les débits d'air neuf et d'air extrait respectivement prélevé et rejeté par la VMC double flux, ainsi que le débit d'air de combustion prélevé par le poêle à granulés étanche. Le principe de mesure est basé sur le transfert de chaleur entre un film fin chauffé électriquement et le milieu considéré.

Tableau 3.7 : Caractéristiques du capteur de vitesse à film chaud HÖNTZSCH

Matériel	Caractéristiques techniques	Vue
Capteur de vitesse à film chaud HÖNTZSCH : TA10	Étendue de mesure : 0,2 à 60 m/s	
	Tenue en température : -10 à 140°C	
	Précision : $\pm 2\%$ v.m. jusqu'à 40 m/s $\pm 0,02$ m/s	
	Précision : $\pm 2,5\%$ v.m. entre 40 et 60 m/s	
	Diamètre de la sonde : 10 mm	
	Diamètre minimum de conduite : 25 mm	
	Afficheur/transmetteur déporté et configurable via PC	

v.m. : valeur mesurée

De la même façon que pour les capteurs à moulinet et avec les mêmes précautions de mise en œuvre, les capteurs de vitesse à film chaud peuvent donner la vitesse moyenne de l'écoulement dans une conduite circulaire en utilisant un facteur de profil F_p approprié (cf. Tableau 3.8).

Tableau 3.8 : Facteurs de profil des capteurs de vitesse à film chaud HÖNTZSCH

Diamètre de conduite	[mm]	25	40	50 et +
Facteur de profil : F_p	[-]	0,725	0,810	0,840

➤ Mesure de la température

Lors des essais en laboratoire sur le système combiné, on dispose de 42 thermocouples de type K et de 12 thermocouples de type T. Les thermocouples de type T sont utilisés pour mesurer la température de l'air de combustion dans les deux passages annulaires en entrée et en sortie du conduit échangeur. Ils sont étalonnés entre 0 et 100°C avec une précision de $\pm 0,06^\circ\text{C}$ suivant le même protocole que celui détaillé lors de la présentation des capteurs de température au Chapitre 2.

Concernant les thermocouples de type K, les 12 premiers sont utilisés préférentiellement sur les fumées et sont étalonnés entre 0 et 250°C avec une précision de $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Les 15 suivants sont utilisés sur l'air de ventilation et sont étalonnés entre 0 et 140°C avec une précision de $\pm 0,06^\circ\text{C}$. Les 15 derniers sont utilisés sur l'air ambiant et sur l'air extérieur ; ils sont étalonnés entre 0 et 100°C avec une précision de $\pm 0,06^\circ\text{C}$.

➤ Mesure du taux de CO et de CO₂ de l'air de ventilation

Un capteur transmetteur de CO et de CO₂ est utilisé pour mesurer à la fois le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone contenu dans l'air de ventilation qui a circulé dans le CETP-NI. Il s'agit du modèle aSENSE[®] mIII du constructeur SenseAir, qui est basé sur un capteur à cellule électrochimique sensible pour la mesure du CO et sur un capteur infrarouge non-dispersif (NDIR) pour la mesure du CO₂ et dont les caractéristiques techniques sont données dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Caractéristiques du capteur de CO et de CO₂ SenseAir

Matériel	Caractéristiques techniques	Vue
Capteur de CO/CO ₂ SenseAir : aSENSE [®] mIII	Gamme de mesure du CO : 0 à 100 ppm	
	Précision de mesure du CO : ± 10 ppm	
	Gamme de mesure du CO ₂ : 0 à 3000 ppm	
	Précision de mesure du CO ₂ : ± 30 ppm	
	Capacité d'enregistrement : 2 x 960 valeurs	
	Intervalle d'enregistrement : 2 minutes	
	Alimentation / Sortie : 24 V / 4-20 mA	
	Consommation propre : < 3 W	

➤ Mesure des particules dans l'air de ventilation

Le CERIC dispose d'un analyseur granulométrique ELPI (Electrical Low-Pressure Impactor) fabriqué par DEKATI et dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Caractéristiques de l'analyseur granulométrique DEKATI

Matériel	Caractéristiques techniques	Vue
Analyseur granulométrique DEKATI : ELPI	Taille particules : 10 nm à 10 μm	
	Débit aspiration : 30 l/mn	
	Nombre d'étages : 13 dont 12 avec détection électrique	
	Diamètre des plateaux : 25mm	
	Pression au dernier étage : 100mbar	
	Conditions d'utilisation : 15 à 50°C / 0 à 75% HR	
	Temps de réponse : 1 seconde (option à 0,1 seconde)	
	Procédure de zéro automatique	
	Logiciel : pilotage, acquisition et traitement des données	

Cet appareil permet de mesurer la concentration particulaire d'un aérosol par classe de taille. Le résultat obtenu est la distribution granulométrique en nombre, en surface, en volume ou en masse de l'aérosol étudié. La taille des particules est obtenue par classification inertielle au moyen d'une rampe d'impacteurs montés en cascade fonctionnant à basse pression. La concentration particulaire est calculée à partir de la mesure de la charge électrique portée par les particules.

L'analyseur granulométrique est utilisé pour analyser le contenu particulaire de l'air extérieur, puis celui de l'air neuf en aval de la VMC-DF et enfin celui de l'air de ventilation en aval du CETP-NI par rapport à celui de l'air ambiant, de manière à évaluer la qualité de l'air soufflé dans l'habitation.

➤ Mesure des consommations électriques

Le Tableau 3.11 donne les principales caractéristiques techniques des deux compteurs de consommation électrique qui sont utilisés pour connaître l'électricité consommée par le poêle et par la VMC-DF dans leurs différents modes de fonctionnement.

Tableau 3.11 : Caractéristiques du compteur de consommation électrique VOLTcraft

Matériel	Caractéristiques techniques	Vue
Compteur de consommation électrique	Gamme de puissance active : 1,5 à 3000 W Précision et Résolution : 0,1 W / Mesure du $\cos \varphi$ Mesure de consommation : 1 Wh à 9999 kWh Durée d'enregistrement : 99 jours maxi Alimentation : 230 V à 50 Hz Consommation propre : 1,8 W	
VOLTcraft : Monitor 3000		

➤ Acquisition des données et analyse de la combustion

La centrale d'acquisition CR1000 de CAMPBELL SCIENTIFIC et l'analyseur de combustion portable 330-2 de TESTO présentés dans la partie 2.2.3 sont à nouveau utilisés lors des essais en laboratoire sur le système combiné.

La masse de combustible brûlé est également déterminée lors des essais pour chacun des trois régimes de fonctionnement du poêle à granulés. Pour ce faire, la trémie de l'appareil est tout d'abord remplie au maximum avant chaque essai. Un sac plein de granulés de bois est ensuite pesé au moyen d'une balance électronique. En fin d'essai, la trémie est à nouveau remplie et une nouvelle pesée est effectuée pour connaître le poids des granulés restants. La différence des deux pesées divisée par la durée de l'essai permet alors d'obtenir le débit massique de combustible utilisé par l'appareil.

➤ Instrumentation du banc d'essai

Le débit d'air de combustion prélevé par le poêle étanche est mesuré avec un capteur de vitesse à film chaud placé au centre du tronçon de raccordement de diamètre 80 mm situé entre l'arrière de l'appareil et l'élément droit de prise d'air (EDPA) du conduit de cheminée. Un facteur de profil d'une valeur de 0,84 est alors utilisé pour obtenir la vitesse moyenne de l'air de combustion dans la veine d'écoulement. Un transmetteur à fil chaud TSI tel que celui décrit dans le paragraphe 2.2.3 est utilisé pour évaluer le débit de l'air neuf soufflé directement dans le séjour sans passer dans le CETP-NI. Les sondes à moulinet en inox et en aluminium sont utilisées respectivement sur les fumées et sur l'air de ventilation après son passage dans le CETP-NI. Des régulateurs de débit sont placés sur chacune des bouches de soufflage d'air neuf, avec une limitation à 30 m³/h pour chacune des quatre bouches correspondant au soufflage dans les chambres et à 45 m³/h pour celle distribuant le séjour.

Les différentes températures sont mesurées en utilisant des thermocouples chemisés de type K, à l'exception de la température moyenne de l'air de combustion dans les deux espaces annulaires situés en amont et en aval du CETP qui est évaluée avec des thermocouples de type T grâce à 6 points de mesure décalés de 60° les uns des autres. Les prélèvements d'air réalisés avec l'analyseur granulométrique sont effectués successivement dans l'air neuf prélevé à l'extérieur en amont de la VMC-DF (référence), puis dans l'air neuf de ventilation en aval de la VMC-DF mais en amont du CETP-NI, ensuite dans l'air neuf de ventilation en aval du CETP-NI et enfin dans l'ambiance.

Le schéma de la Figure 3.10 reprend le schéma de principe du système combiné en laboratoire en y précisant la nature et les lieux d'implantation des différents capteurs.

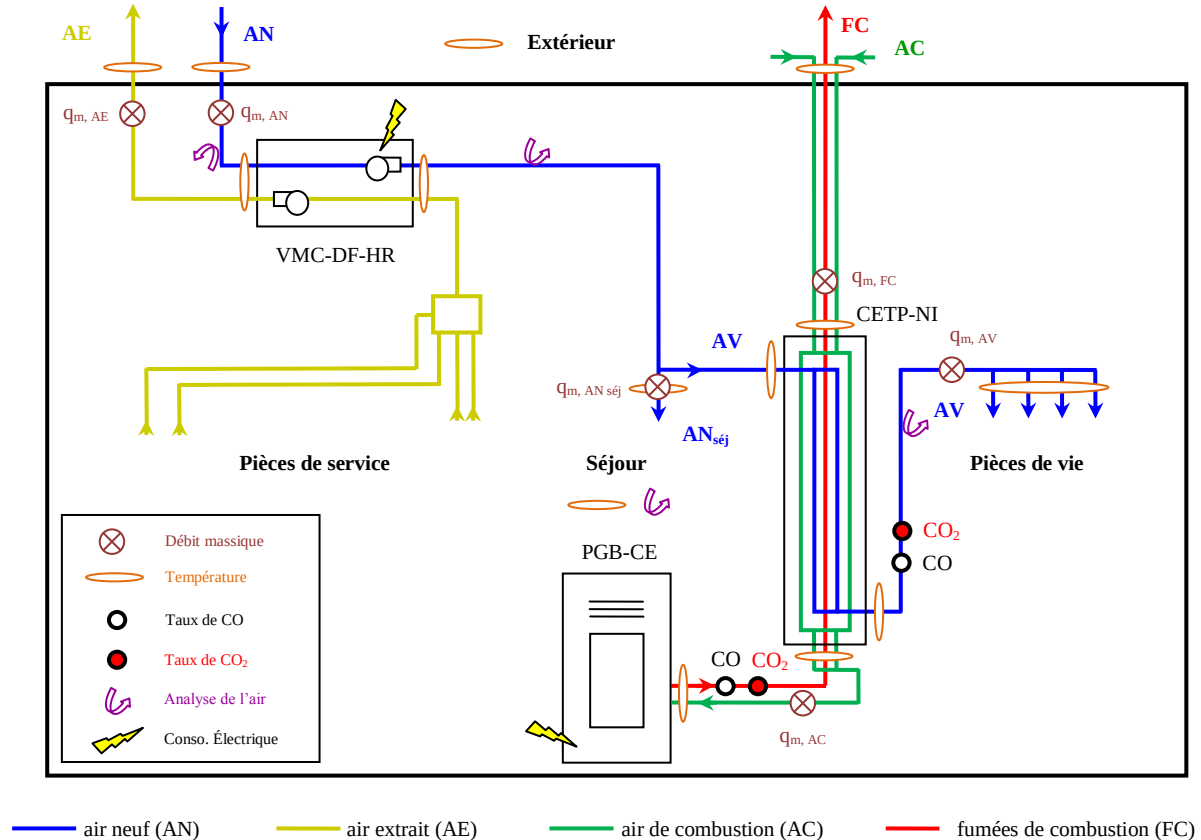


Figure 3.10 : Schéma de principe du système combiné instrumenté

➤ **Réalisation**

La Figure 3.11 propose différentes vues des étapes de la réalisation du banc d'essai au CERIC entre janvier et mars 2010. Les essais sur le système combiné de ventilation et de chauffage au bois se sont ensuite déroulés entre mars et mai 2010.



Figure 3.11 : Vues de quelques étapes de la réalisation du banc d'essai sur le système combiné

3.2. RÉSULTATS DES MESURES EN LABORATOIRE

3.2.1. Analyses effectuées

➤ Analyse de la combustion

Les graphiques de la Figure 3.12 donnent les valeurs des paramètres mesurés et calculés lors de l'analyse de la combustion du poêle ELENA NEW pour les régimes P1-V1, P3-V3 et P5-V5, avec une hauteur du conduit de cheminée d'environ 6 m incluant le prototype n°4 de CETP-NI. On y observe successivement les valeurs mesurées de la température des fumées à la buse de sortie $T_{FC, buse}$ et de la température de l'air de combustion à la buse d'entrée $T_{AC, buse}$, du taux de CO_2 et de la quantité de CO dans les fumées, et enfin les valeurs calculées à partir de la norme EN14785 du rendement η et de la puissance calorifique totale P_{TOT} de l'appareil.

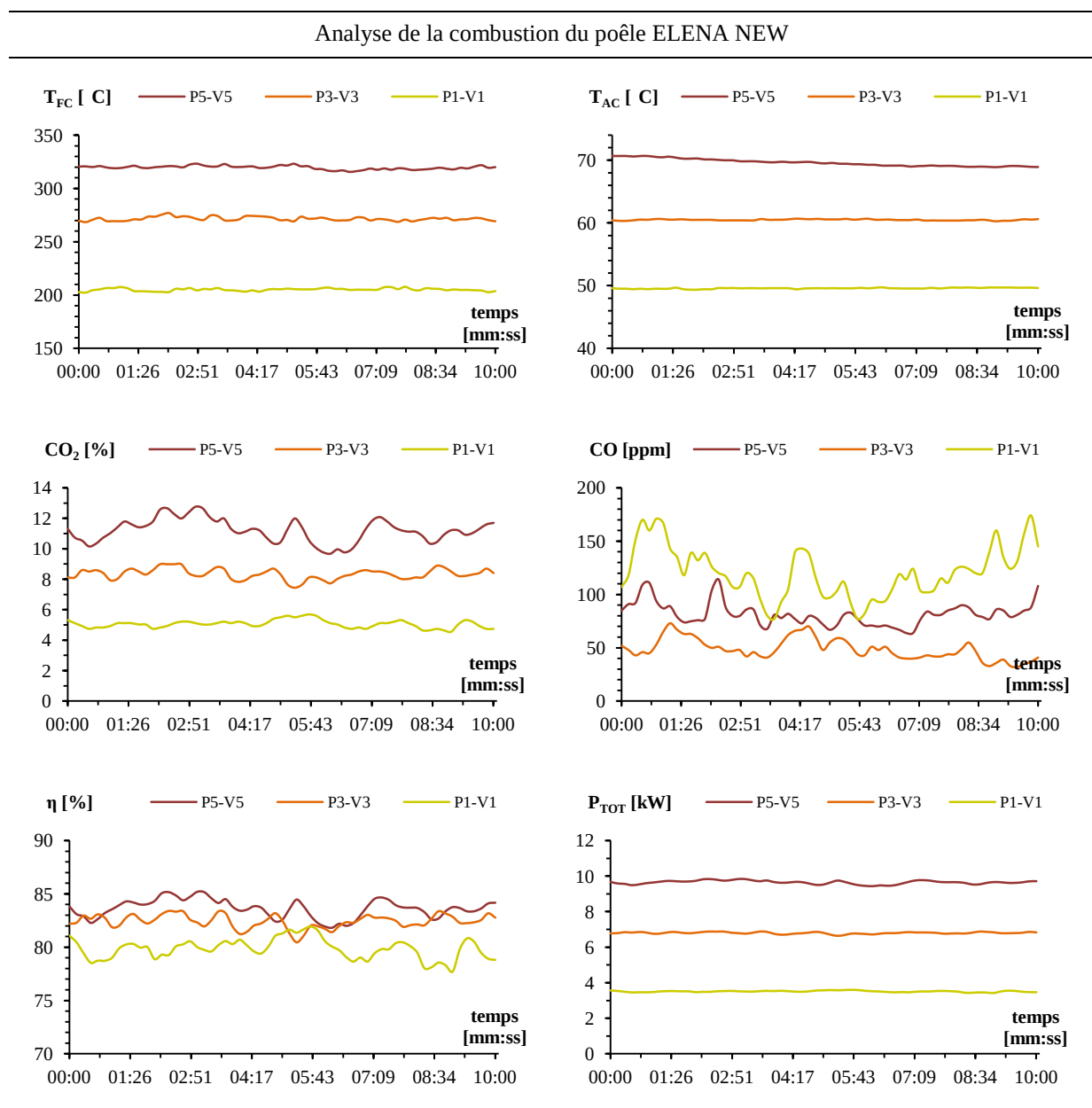


Figure 3.12 : Graphiques de mesures et de résultats de l'analyse de la combustion du poêle ELENA NEW

Les valeurs moyennes des différents paramètres mesurés et calculés lors de l'analyse de la combustion du poêle ELENA NEW, ainsi que le débit massique de combustible brûlé et la valeur moyenne de l'excès d'air λ_{EA} sont rapportées dans le Tableau 3.12 pour chaque régime étudié.

Tableau 3.12 : Mesures et résultats de l'analyse de la combustion du poêle ELENA NEW

Mesure	Unité	P1-V1	P3-V3	P5-V5
$T_{FC, \text{ buse}}$	[°C]	205	270	320
$T_{AC, \text{ buse}}$	[°C]	50	60	70
CO_2	[%]	5	8	11
CO	[ppm]	125	50	100
$q_{m, g}$	[kg/h]	0,8	1,5	2,1
λ_{EA}	[-]	4,1	2,5	1,8
η	[%]	79,7	81,9	83,4
P_{TOT}	[kW]	3,5	6,8	9,6

Si les valeurs moyennes de rendement du poêle ELENA NEW sont près de 10% inférieures à celles annoncées par le constructeur, les résultats de l'analyse de la combustion sont en accord avec ceux qui figurent dans le rapport d'essai n°1009 du laboratoire CERIC, indiquant un rendement moyen de 79,0% à P1-V1 et de 84,6% à P5-V5 pour cet appareil avec un raccordement vertical de 8 m. Les principales observations sur le fonctionnement de cet appareil sont également proches de celles décrites dans ce rapport, à savoir que les températures des fumées au niveau de la buse de sortie sont élevées et que le passage de l'air de combustion dans l'espace annulaire du conduit concentrique permet d'atteindre des températures d'admission d'air qui favorisent le rendement de l'appareil.

Lors de nos essais, la température moyenne de l'air de combustion au niveau de la buse d'admission du poêle est cependant moins élevée que celle mesurée par le CERIC et qui vaut respectivement 79,7°C et 132,9°C aux puissances minimum et maximum de l'appareil. En effet, lors de son passage dans le conduit échangeur, non seulement l'air de combustion n'est plus au contact du tube qui transporte les fumées, mais il contribue aussi au réchauffement de l'air neuf de ventilation. L'influence sur le rendement du poêle reste néanmoins très faible avec une diminution d'1% environ.

➤ Analyse des consommations électriques

Les Tableaux 3.13 et 3.14 donnent les consommations électriques moyennes de la VMC-DF et du poêle à granulés de bois pour les différents modes de fonctionnement étudiés.

Tableau 3.13 : Consommations électriques de la VMC-DF à haut rendement AKOR HR

AKOR HR	Allure	Réduite	Normale	Élevée
Électricité	[W]	15	25	40

Tableau 3.14 : Consommations électriques du poêle à granulés de bois ELENA NEW

ELENA NEW	Régime	P1-V1	P3-V3	P5-V5
Électricité	[W]	35	55	80

➤ Analyse des particules dans l'air de ventilation

L'analyse granulométrique de l'air est effectuée lors de l'essai à P3-V3 du 16 mars 2010. Des prélèvements sont successivement réalisés dans l'air neuf extérieur, dans l'air neuf de ventilation juste après le passage dans l'unité centrale de la VMC-DF (air VMC-DF), dans l'air neuf de ventilation en aval du conduit échangeur à triple paroi (air CETP) et dans l'air ambiant. Le spectre couvert par l'analyse s'étend aux particules dont le diamètre se situe entre 0,04 et 10 μm .

Sur la Figure 3.13, le graphique de gauche montre que le nombre de particules par cm^3 est plus important dans l'air ambiant que dans l'air extérieur. Cela provient principalement de l'activité qui règne dans la pièce, mais aussi du fonctionnement du poêle à granulés qui peut être considéré comme une source d'émission et de remise en suspension de particules. Ainsi, le renouvellement de l'air ambiant par l'air extérieur contribue à l'amélioration progressive de la qualité de l'air intérieur.

Sur le graphique de droite, on observe que la quasi-totalité des particules analysées ont un diamètre inférieur à 1,2 μm . Il s'agit donc de particules très fines (proches de la classification PM1) qui peuvent présenter un impact important sur la santé, car elles ne sont pas retenues dans les narines et la gorge, mais pénètrent profondément dans l'organisme jusqu'aux poumons puis dans le sang.

Néanmoins, on observe la légère diminution du nombre total de particules fines dans l'air neuf de ventilation après qu'il soit passé par l'échangeur de la VMC-DF et un peu plus encore après qu'il ait traversé le CETP. En effet, la VMC-DF est équipée de 2 filtres de classe G3 pour protéger l'échangeur au niveau du soufflage et de la reprise, et même si leur rôle consiste surtout à retenir les éléments les plus grossiers d'un diamètre supérieur à 10 μm , des particules fines peuvent s'impacter au niveau de ces filtres et dans certaines irrégularités du réseau. L'air de ventilation contient alors de moins en moins de particules à mesure de sa progression dans le réseau de soufflage, ce qui valide la bonne étanchéité du système et contribue à limiter les risques respiratoires pour les occupants.

Finalement, grâce aux filtres de la VMC-DF et à la bonne étanchéité du CETP, le système a tendance à favoriser la qualité de l'air dans l'habitation en apportant de l'air neuf dont la concentration particulaire est plus de trois fois inférieure à celle de l'ambiance dans le cas étudié.

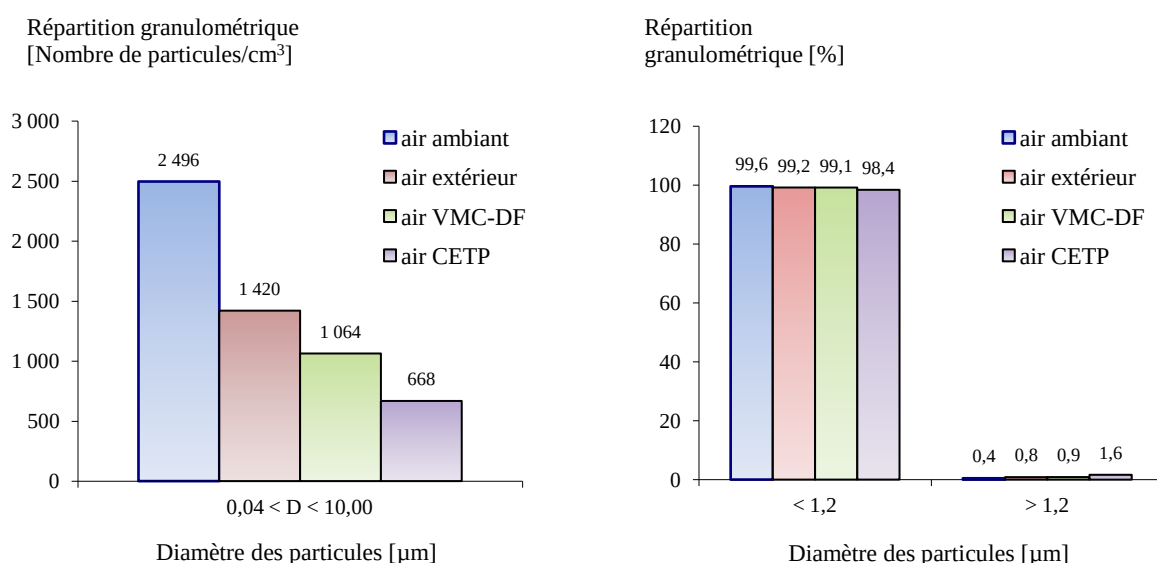


Figure 3.13 : Analyse granulométrique de l'air de ventilation en différents points du réseau de soufflage

➤ Analyse du taux de CO et de CO₂ dans l'air de ventilation

Lors des essais, on relève toutes les 10 secondes les quantités de CO et de CO₂ dans l'air de ventilation après son passage dans le conduit échangeur. Les deux graphiques de la Figure 3.14 donnent ainsi respectivement les résultats obtenus lors des essais réalisés sur le prototype n°3 et n°4. La température des fumées à la buse de l'appareil est également précisée sur chaque graphique.

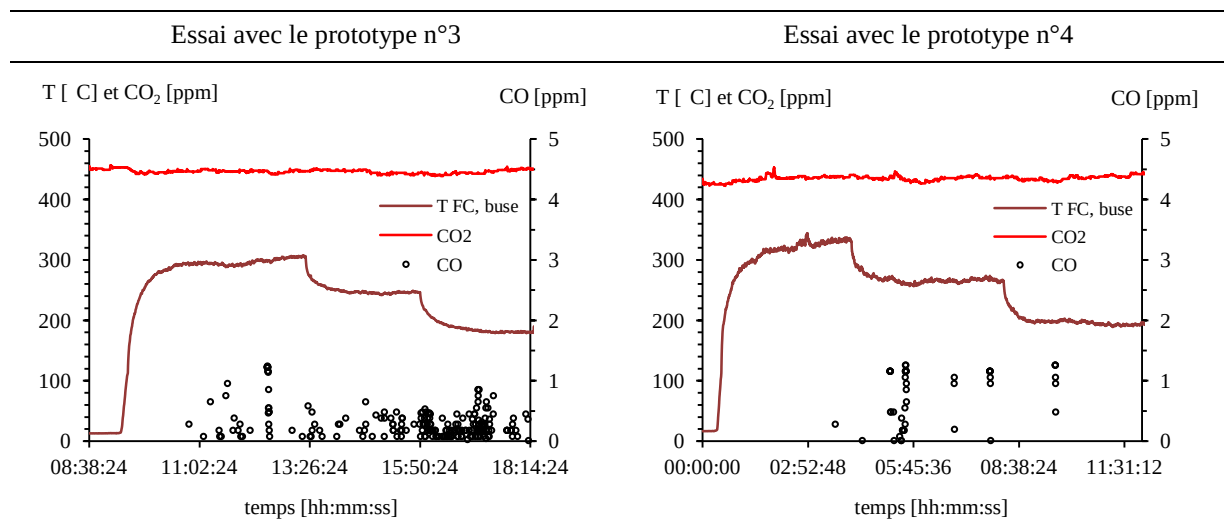


Figure 3.14 : Quantités de CO et de CO₂ contenues dans l'air de ventilation en aval du CETP

Même si sa présence est le plus souvent corrélée au fonctionnement du poêle à granulés, le CO mesuré dans l'air de ventilation ayant circulé dans le conduit échangeur est presque inexistant avec des valeurs toujours **inférieures ou égales à 1,5 ppm** alors que celles mesurées dans les fumées sont en moyenne comprises entre 50 et 150 ppm comme l'indique le quatrième graphique de la Figure 3.12.

Ces résultats sont tout à fait satisfaisants lorsque l'on sait que le niveau moyen de CO dans les habitations est souvent compris entre 0,5 et 5 ppm. De plus, même en tenant compte de la faible précision du capteur, annoncée à ± 10 ppm, ces mesures restent bien inférieures à 35 ppm, qui est la première valeur critique à partir de laquelle peuvent apparaître des maux de tête et des étourdissements dans un délai de six à huit heures après le début d'une exposition prolongée.

Le niveau de CO₂ mesuré dans l'air de ventilation ayant circulé dans le conduit échangeur est compris **entre 400 et 500 ppm**. Ce niveau de concentration est tout à fait normal et acceptable et même avec une précision de mesure de ± 30 ppm, on reste bien en dessous des 800 ppm qui peuvent annoncer des premiers signes de fatigue à cause d'une trop forte présence de CO₂ dans l'air.

En synthèse, l'utilisation du CETP, dans lequel circule en pulsion tout ou une partie de l'air neuf de ventilation, ne présente pas de risque d'intoxication, ni même d'exposition importante aux gaz CO et CO₂ pour les occupants. Ces résultats confortent aussi l'intérêt de placer le CETP en aval de la VMC-DF qui permet d'assurer à la fois la filtration et la régulation des débits de l'air de ventilation. Enfin, il importe de veiller à maintenir la qualité de la réalisation de chaque prototype pour garantir la sécurité complète des occupants, avec un contrôle systématique de l'étanchéité entre les zones de circulation des trois fluides au sein du CETP (cf. Tableau 3.6).

3.2.2. CETP-NI composé d'une seule partie

➤ Température des fumées en entrée du CETP-NI n°3

La Figure 3.15 présente l'évolution de la température des fumées à l'entrée du CETP-NI n°3 pour les trois principaux régimes de fonctionnement du poêle à granulés à combustion étanche.

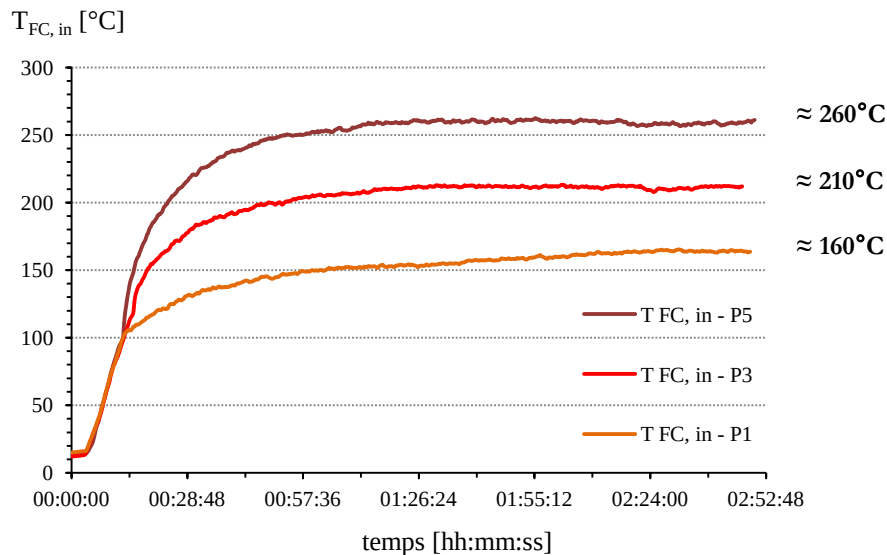


Figure 3.15 : Évolution de la température des fumées en entrée du CETP-NI n°3

On observe tout d'abord que la température s'élève en suivant une même pente quel que soit le régime de fonctionnement, puis qu'elle s'établit avec un écart d'environ 50°C entre chacun des régimes étudiés. Enfin, on peut noter que la température des fumées à l'entrée du conduit échangeur a tendance à se stabiliser plus rapidement lorsque le régime du poêle est élevé, mais de manière générale le régime permanent est atteint au bout de 2 heures 30 minutes de fonctionnement.

➤ Puissances échangées au sein du CETP-NI n°3

Le graphique de la Figure 3.16 présente les valeurs des puissances cédées par les fumées $\dot{Q}_{FC}$ et par l'air de combustion $\dot{Q}_{AC}$ ainsi que celles récupérées par la partie de l'air neuf de ventilation $\dot{Q}_{AV}$ circulant dans le CETP-NI n°3, aux régimes de fonctionnement minimum P1-V1, intermédiaire P3-V3 et maximum P5-V5 du poêle à combustion étanche. Les tableaux des principaux résultats des essais en laboratoire sur le système combiné équipé du CETP-NI n°3 sont donnés en Annexe 4.

De manière générale, en fonction du régime du poêle, les puissances récupérées sur l'air de ventilation au sein du CETP se situent entre **200 W** et **225 W** à P1-V1, entre **350 W** et **375 W** à P3-V3 et entre **500 W** et **525 W** à P5-V5.

Les puissances échangées augmentent donc sensiblement avec l'élévation du régime de fonctionnement du poêle. On récupère ainsi deux fois plus de chaleur sur l'air neuf de ventilation au régime maximum P5-V5 qu'au régime minimum P1-V1. Ces résultats sont intéressants car les écarts entre les différents régimes n'étaient pas aussi marqués lors des essais précédents sur le CETP-PI avec le poêle à granulés non étanche (cf. Figure 2.34).

Ensuite, bien qu'on observe une légère augmentation des puissances échangées lorsque le débit d'air de ventilation s'élève, c'est-à-dire lorsque la valeur du coefficient z diminue, les faibles écarts de puissance échangée entre les différentes allures de la VMC-DF semblent traduire le fait que la zone d'échange est trop courte pour que les transferts thermiques puissent être véritablement influencés par le régime d'écoulement de l'air de ventilation.

On remarque également que la somme des puissances cédées ne correspond pas tout à fait à celle qui est récupérée par l'air de ventilation. En effet, comme le CETP n'est pas isolé, une partie de la chaleur cédée par l'air de combustion est transmise à l'environnement extérieur à travers la paroi externe du conduit échangeur.

Les puissances récupérées par l'air de ventilation restent cependant assez proches de celles cédées par les fumées, ce qui montre que l'échange thermique est prédominant du côté des fumées. À ce titre, on peut noter qu'au régime minimum P1-V1 du poêle, les valeurs des puissances récupérées par l'air de ventilation et cédées par les fumées sont semblables, ce qui laisse entendre que les pertes vers l'extérieur doivent être proches des valeurs des puissances cédées par l'air de combustion.

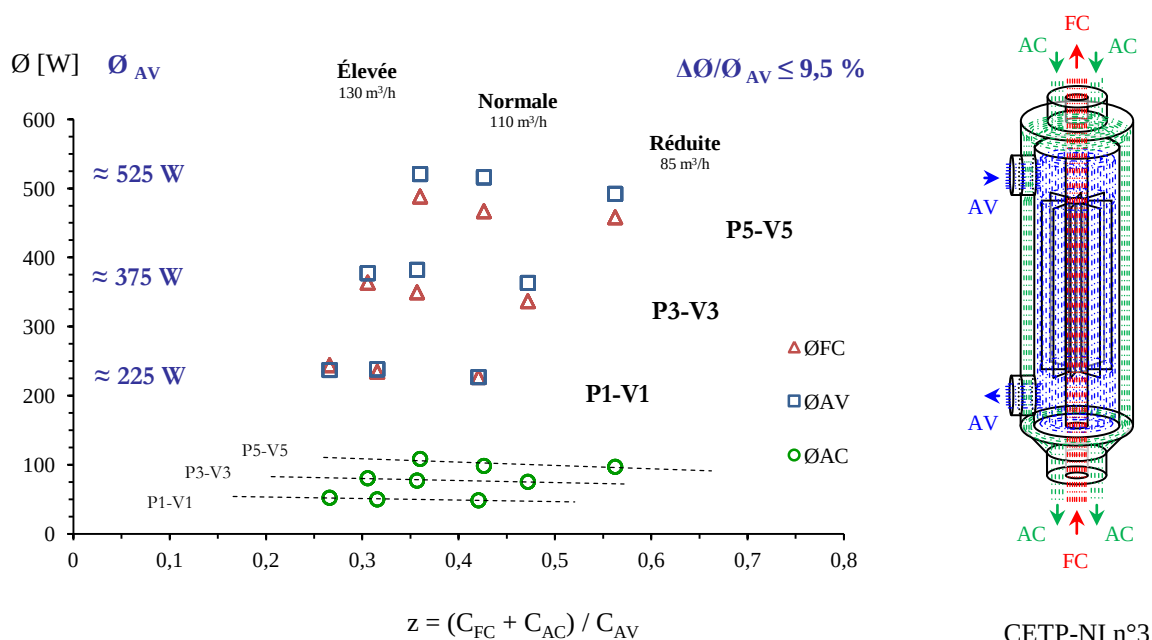


Figure 3.16 : Puissances échangées au sein du CETP-NI n°3

Le Tableau 3.15 donne les valeurs des incertitudes sur les puissances échangées pour chacun des trois fluides étudiés. De manière générale, le niveau de ces incertitudes peut être considéré comme acceptable car il reste inférieur à 11,6%. Enfin, l'incertitude liée à la mesure de la vitesse représente plus de 50% de l'incertitude totale sur l'évaluation de la puissance échangée et l'incertitude liée à la mesure des écarts de température y contribue jusqu'à hauteur de 20% environ. La méthodologie du calcul de l'incertitude sur les puissances échangées et sur l'efficacité est donnée en Annexe 2.

Tableau 3.15 : Incertitudes sur les puissances échangées au niveau de chaque fluide (CETP-NI n°3)

	fumées de combustion	air de combustion	air de ventilation
$\Delta\theta / \theta$	$\leq 11,6\%$	$\leq 7,7\%$	$\leq 9,5\%$

➤ Influence du passage de l'air de combustion

Les puissances cédées par l'air de combustion restent assez faibles et s'établissent aux environs de **50 W** à P1-V1, de **75 W** à P3-V3 et de **100 W** à P5-V5. Ainsi, même si l'air de combustion ne contribue presque pas au réchauffement de l'air neuf de ventilation, il ne cède pas non plus beaucoup de chaleur vers l'extérieur et empêche surtout toute déperdition de chaleur depuis la zone où circule l'air de ventilation vers l'ambiance. Il est également préférable que la température de l'air de combustion soit la plus élevée possible lors de son admission afin d'augmenter le rendement de l'appareil. Ainsi, malgré son passage dans le conduit échangeur, où sa température chute de manière évidente, celle-ci augmente ensuite très rapidement au niveau du dernier élément de conduit, appelé élément droit de prise d'air (EDPA), comme le montre le graphique de la Figure 3.17.

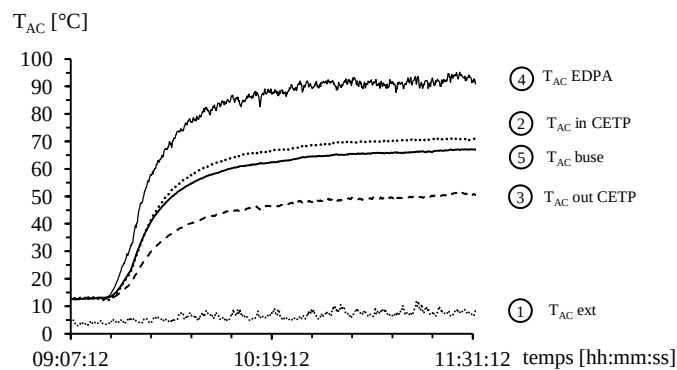


Figure 3.17 : Évolution de la température de l'air de combustion le long de la cheminée (CETP-NI n°3)

On observe également sur le graphique de la Figure 3.17 que la chute de température de l'air de combustion est très importante le long de la portion de conduit situé entre l'EDPA et la buse du poêle, avec ici environ 25°C de perdu. Il est donc particulièrement intéressant d'isoler cet élément de raccordement, qui est souvent un flexible métallique, pour conserver la chaleur récupérée par l'air de combustion et contribuer à maintenir un rendement du poêle qui soit le plus élevé possible.

➤ Puissances disponibles en entrée du CETP-NI n°3

Les deux graphiques de la Figure 3.18 montrent que les différents niveaux de puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion en entrée du CETP sont bien plus marqués avec le poêle à granulés ELENA NEW que précédemment avec le poêle LISA (cf. Figure 2.35).

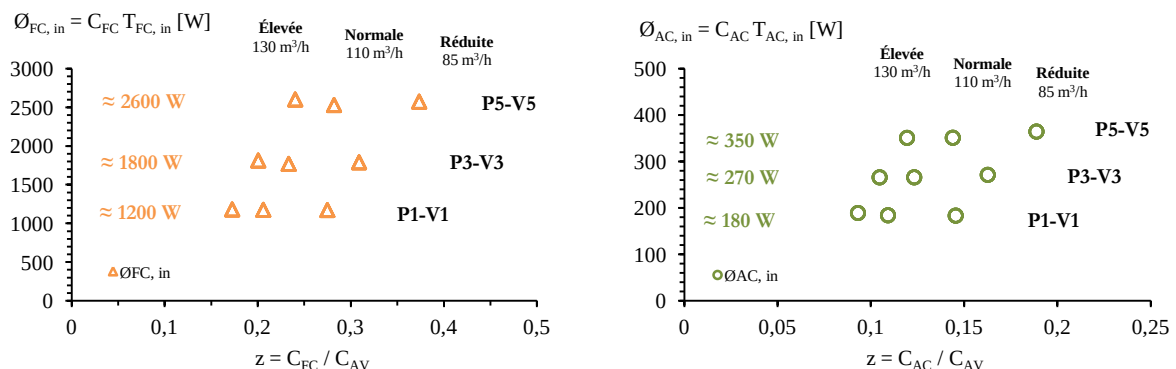


Figure 3.18 : Puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°3)

➤ Puissances maximum récupérables au sein du CETP-NI n°3

Le graphique de la Figure 3.19 montre que la puissance maximum récupérable par l'air de ventilation circulant au sein du CETP-NI n°3 vaut environ 1150 W à P1-V1, 1800 W à P3-V3 et 2550 W à P5-V5, conformément à la définition donnée par l'équation (2.23). L'incertitude sur ces valeurs est ici inférieure ou égale à 21,5%.

En comparant ces valeurs à celles présentées sur le graphique de la Figure 2.36, il apparaît très nettement que les régimes de fonctionnement du poêle à granulés à combustion étanche ELENA NEW sont beaucoup plus marqués que ceux du poêle LISA utilisé précédemment. Ainsi, même si la puissance maximum récupérable est sensiblement identique pour les deux appareils à P1-V1, elle est maintenant plus élevée au régime P3-V3 du nouveau poêle qu'au régime P5-V5 de l'ancien appareil.

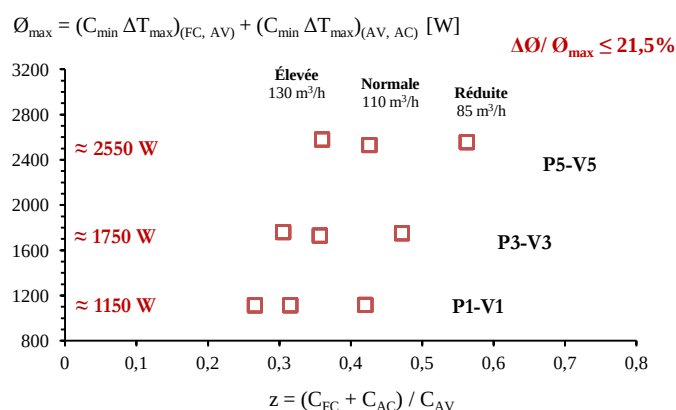


Figure 3.19 : Puissances maximum récupérables sur l'air de ventilation (CETP-NI n°3)

Les deux graphiques de la Figure 3.20 permettent d'avoir une vision plus précise des puissances maximum récupérables par l'air de ventilation respectivement du côté des fumées et de l'air de combustion, en fonction des différents régimes de fonctionnement du poêle et de la VMC-DF.

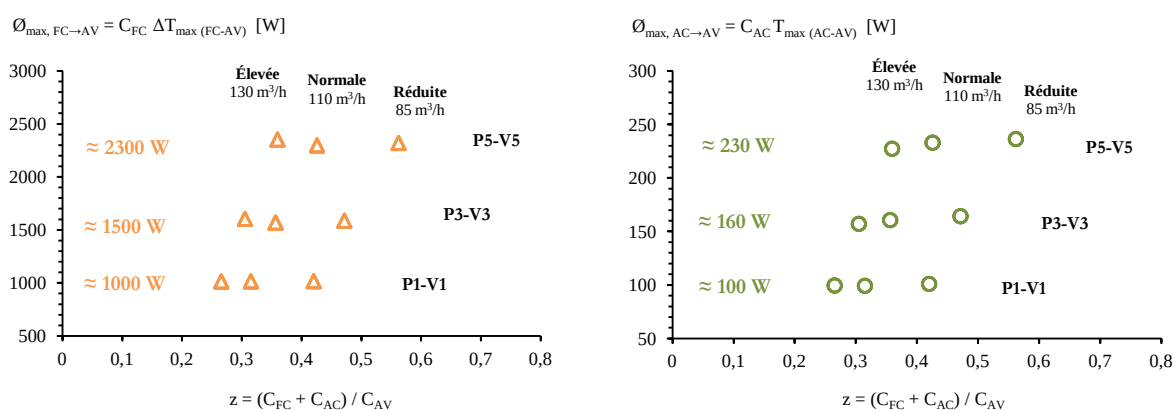


Figure 3.20 : Puissances maximum récupérables sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°3)

Les différents régimes du poêle sont une nouvelle fois bien identifiables sur les deux graphiques de la Figure 3.20 et on observe sur le graphique de droite que la valeur de $\dot{Q}_{\max AC \rightarrow AV}$ reste comprise entre 100 et 230 W environ, ce qui signifie que la puissance récupérable du côté de l'air de combustion représente au mieux environ 10% du potentiel total de récupération de chaleur.

➤ Efficacité de l'échange au sein du CETP-NI n°3

Le graphique de la Figure 3.21 présente les valeurs de l'efficacité de l'échange $E_{\text{CETP-NI}}$ au sein du CETP-NI n°3 en fonction du rapport adimensionnel z pour les trois régimes de fonctionnement du poêle. Les courbes pointillées haute et basse délimitent les zones d'incertitude des mesures réalisées. Ici, l'incertitude sur l'efficacité de l'échange (cf. Annexe 2 pour la méthodologie d'évaluation et Annexe 4 pour les valeurs calculées) est inférieure ou égale à 30,4%.

De la même manière qu'au paragraphe 2.3.2, on observe tout d'abord que l'efficacité de l'échange dépend peu du régime de fonctionnement du poêle à granulés. Elle s'établit ainsi entre **19% et 22%** sur la plage des débits d'air de ventilation étudiés et circulant dans le CETP-NI n°3. Ces valeurs d'efficacité sont légèrement inférieures à celles déterminées lors des essais sur le CETP-PI, ce qui s'explique par le fait que l'échangeur de chaleur n'est plus isolé et que les débits d'air neuf de ventilation ne sont plus aussi élevés.

On peut noter que les valeurs d'efficacité correspondant à l'allure normale de la VMC-DF sont celles qui présentent l'écart le plus important par rapport à la courbe de tendance principale. Par ailleurs, l'efficacité du CETP-NI n°3 semble être légèrement surestimée à P3-V3, en revanche elle apparaît être légèrement sous-évaluée à P5-V5. Enfin, on retrouve bien que l'efficacité de l'échange augmente au fur et à mesure que le rapport adimensionnel z diminue, c'est-à-dire lorsque le débit d'air neuf de ventilation augmente.

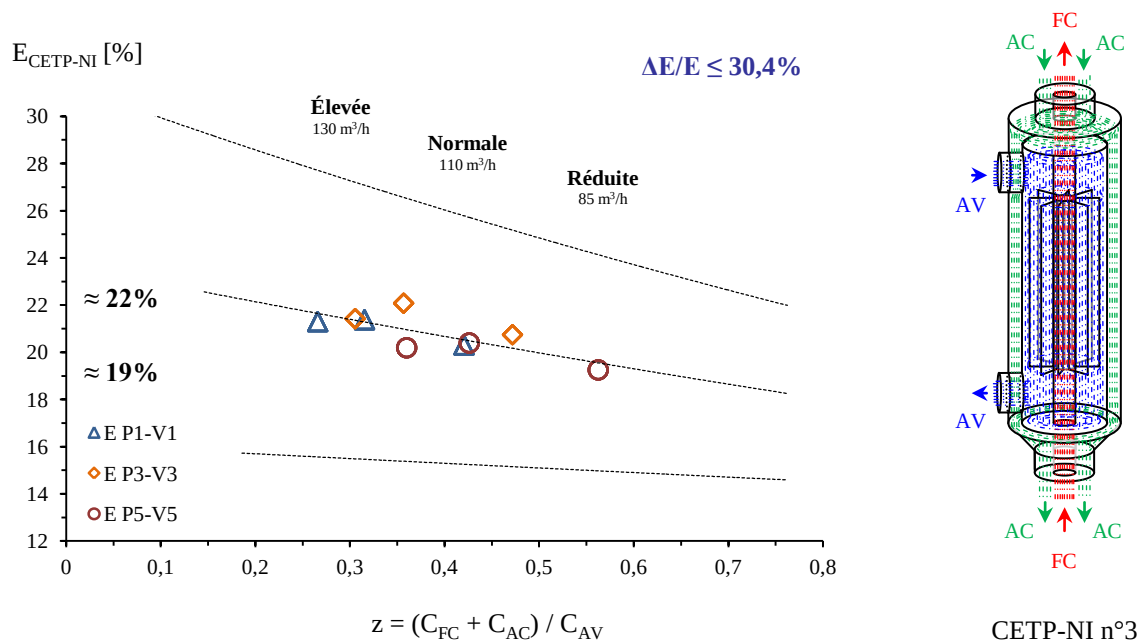


Figure 3.21 : Efficacité de l'échange au sein du CETP-NI n°3

Ainsi, les résultats obtenus pour le prototype CETP-NI n°3 sont assez conformes à ce que l'on pouvait prévoir, c'est-à-dire qu'ils mettent en évidence une augmentation des puissances échangées compte tenu de l'utilisation d'un nouveau poêle à granulés à combustion étanche avec des régimes de fonctionnement mieux identifiés, ainsi qu'une légère diminution de l'efficacité de l'échange car le prototype n'est plus parfaitement isolé et parce que les débits d'air neuf de ventilation qui y circulent sont moins élevés.

➤ Puissances récupérées et efficacité de l'échange au sein de la VMC-DF

Le graphique de la Figure 3.22 présente les puissances récupérées par l'air neuf $\dot{Q}_{AN\ DF}$ et cédées par l'air extrait $\dot{Q}_{AE\ DF}$ au niveau de la VMC-DF, ainsi que les valeurs des puissances maximum récupérables sur l'air neuf $\dot{Q}_{max\ DF}$ lors des essais sur le système combiné équipé du CETP-NI n°3. Ces résultats sont obtenus pour chacune des allures de l'unité de ventilation et pour les trois principaux régimes de fonctionnement du poêle à granulés à combustion étanche.

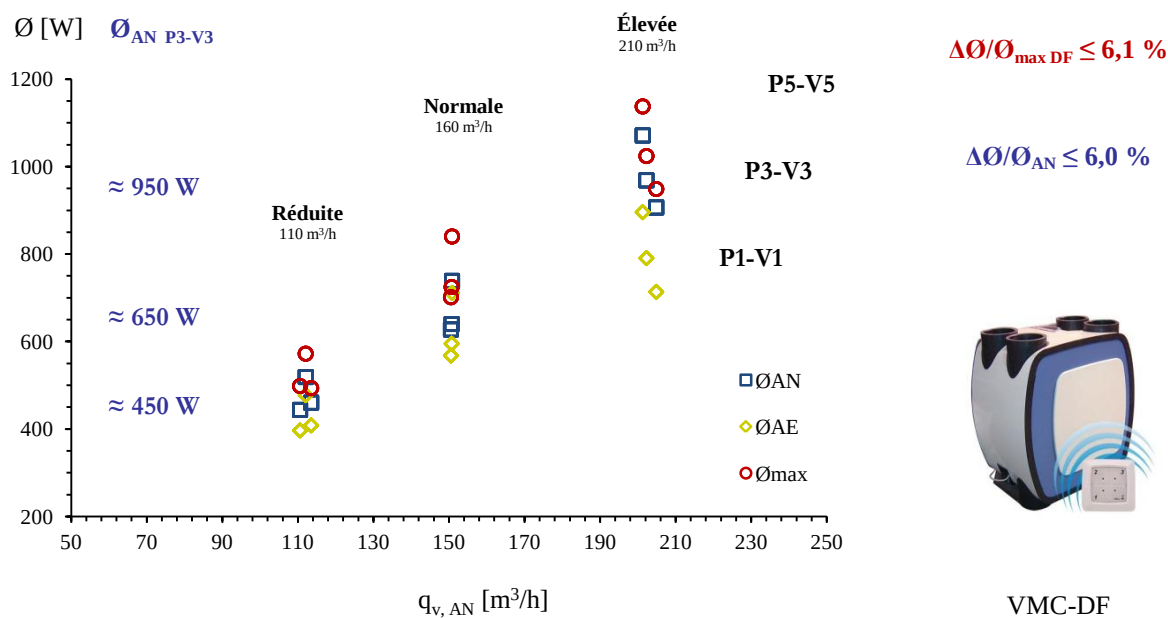


Figure 3.22 : Puissances transférées et maximum récupérables dans la VMC-DF (CETP-NI n°3)

On observe tout d'abord que les puissances cédées par l'air extrait $\dot{Q}_{AE\ DF}$ au niveau de la VMC-DF sont systématiquement inférieures aux puissances récupérées par l'air neuf $\dot{Q}_{AN\ DF}$ sur le graphique de la Figure 3.22. Ces valeurs incohérentes obtenues sur l'air extrait sont dues à une rotation accidentelle du capteur de débit sur l'air extrait et ne peuvent donc pas être exploitées. Toutefois, la confiance en nos autres mesures est confortée par une incertitude moyenne sur les puissances récupérées et sur les puissances maximum récupérables par l'air neuf qui s'établit autour de 6%.

Les puissances récupérées par la totalité de l'air neuf sont comprises entre 450 W et 1050 W environ, et bien qu'elles leur soient toujours légèrement inférieures, elles sont néanmoins très proches des puissances maximum récupérables. Ainsi, comme le montre le Tableau 3.16, les performances de l'échangeur de la VMC-DF sont élevées, avec une efficacité comprise entre 87,9% et 95,6%.

Tableau 3.16 : Efficacité de l'échange au sein de la VMC-DF (système combiné avec le CETP-NI n°3)

Efficacité de la VMC-DF		Régime de fonctionnement du poêle à granulés		
Allure VMC-DF	Débit d'air neuf	P1-V1	P3-V3	P5-V5
Réduite	110 m³/h	89,0%	93,3%	90,7%
Normale	160 m³/h	89,5%	88,3%	87,9%
Élevée	210 m³/h	95,6%	94,6%	94,2%

3.2.3. CETP-NI composé de deux parties

➤ Température des fumées en entrée du CETP-NI n°4

La Figure 3.23 présente l'évolution de la température des fumées à l'entrée du conduit échangeur pour les trois principaux régimes de fonctionnement du poêle à granulés à combustion étanche. On observe que les températures des fumées de combustion en régime permanent sont légèrement plus élevées que lors des essais précédents, avec même une différence d'environ 20°C lorsque le poêle fonctionne à son régime maximum.

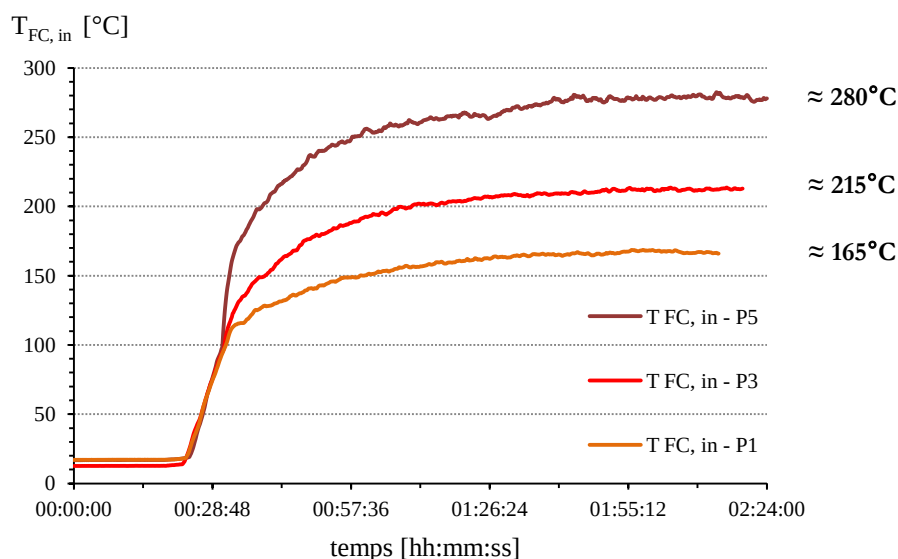


Figure 3.23 : Évolution de la température des fumées en entrée du CETP-NI n°4

Ces différences sont principalement dues aux légères variations des conditions d'essai entre les deux tests sur le système combiné et nous invitent à une certaine prudence lors de la comparaison des résultats obtenus. On peut noter qu'ici encore le régime permanent s'établit en moins de 2h30min.

➤ Puissances échangées au sein du CETP-NI n°4

Le graphique de la Figure 3.24 présente les puissances cédées par les fumées $\dot{Q}_{FC\ exp}$ et par l'air de combustion $\dot{Q}_{AC\ exp}$ ainsi que celles récupérées par l'air neuf de ventilation $\dot{Q}_{AV\ exp}$ lors de l'essai du réalisé sur le CETP-NI n°4 aux régimes de fonctionnement minimum P1-V1, intermédiaire P3-V3 et maximum P5-V5 du poêle à combustion étanche. Les valeurs numériques des principaux résultats des essais en laboratoire sur le CETP-NI n°4 sont données en Annexe 5.

Le Tableau 3.17 donne les incertitudes de mesure maximum sur les puissances échangées par les trois fluides lors des essais sur le CETP-NI n°4. Ici encore, elles s'établissent autour de 10%.

Tableau 3.17 : Incertitudes sur les puissances échangées au niveau de chaque fluide (CETP-NI n°4)

	fumées de combustion	air de combustion	air neuf de ventilation
$\Delta\dot{Q} / \dot{Q}$	$\leq 11,0\%$	$\leq 7,9\%$	$\leq 10,1\%$

De manière générale, on observe sur la Figure 3.24 que les régimes de fonctionnement du poêle sont une nouvelle fois bien identifiés et que la puissance récupérée sur l'air de ventilation est environ deux fois plus importante au régime maximum P5-V5 qu'au régime minimum P1-V1.

La puissance moyenne récupérée par l'air de ventilation au sein du CETP n°4 se situe globalement autour de **350 W** à P1-V1, **550 W** à P3-V3 et **700 W** à P5-V5, pour un fonctionnement de la VMC-DF à allure normale, soit pour un débit d'environ 85 m³/h d'air de ventilation dans le conduit échangeur sur un total d'environ 110 m³/h d'air neuf introduit dans l'habitation. En comparaison des valeurs obtenues lors des essais sur le CETP-NI n°3 pour un même débit d'air de ventilation d'environ 85 m³/h, soit dans ce cas pour l'allure réduite de la VMC-DF (cf. Figure 3.16), la puissance récupérée sur l'air de ventilation a augmentée d'environ 40% à P5-V5, 57% à P3-V3 et 75% à P1-V1.

De plus, on distingue ici un peu plus nettement l'évolution des puissances échangées pour les différentes allures de la VMC-DF. En effet, si le débit maximum d'air de ventilation dans le conduit échangeur est encore de 130 m³/h, le débit minimum vaut maintenant 65 m³/h contre 85 m³/h précédemment. En conséquence, pour un même régime de fonctionnement du poêle, les puissances échangées aux différentes allures de la VMC-DF présentent des écarts légèrement plus importants et les résultats sont répartis sur une plus large étendue en abscisse du fait des plus fortes variations des valeurs du coefficient adimensionnel z .

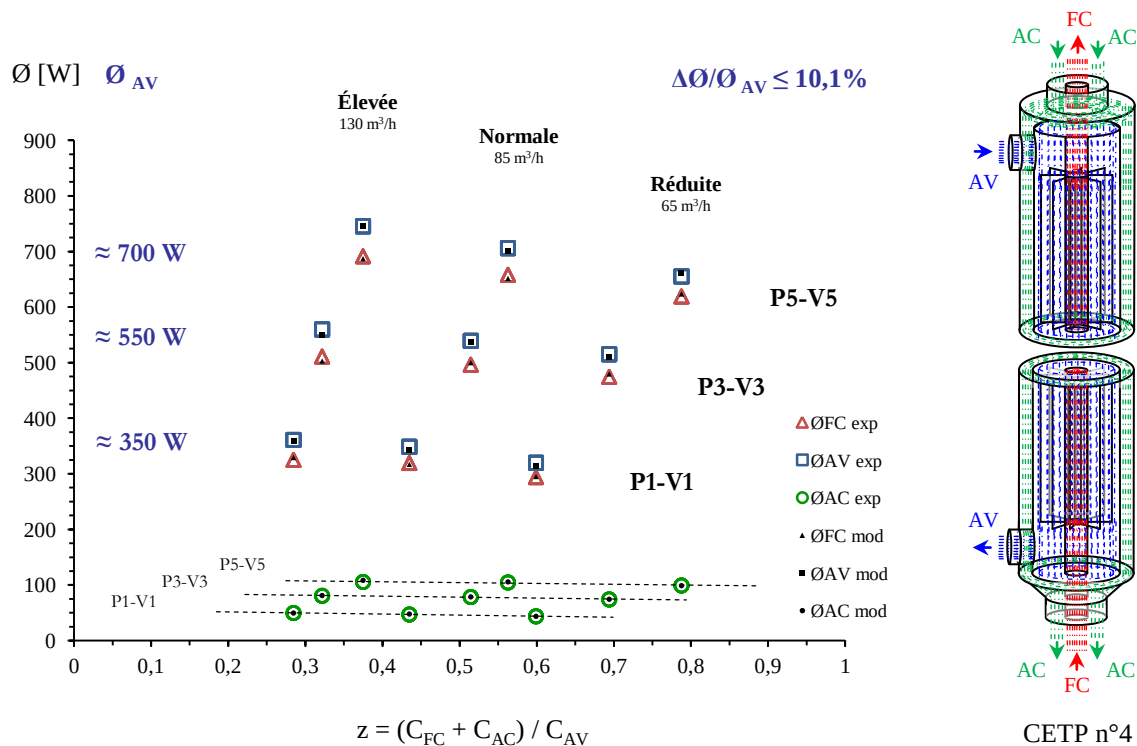


Figure 3.24 : Puissances échangées au sein du CETP n°4

Par ailleurs, les résultats obtenus avec le modèle mathématique de CETP-NI pour les puissances échangées par chacun des trois fluides $\Phi_{FC \text{ mod}}$, $\Phi_{AV \text{ mod}}$ et $\Phi_{AC \text{ mod}}$ sont également présentés sur le graphique de la Figure 3.24. Les valeurs numériques des puissances échangées obtenues avec le modèle sont données en Annexe 6 en comparaison de celles des expériences. De manière générale, le bon accord entre les résultats obtenus par calcul et ceux des essais peut être souligné, avec un écart relatif sur les puissances échangées $|\Phi_{\text{exp}} - \Phi_{\text{mod}}| / \Phi_{\text{exp}}$ qui reste inférieur à 2,8% (cf. Annexe 6).

Les différents paramètres d'entrée du modèle mathématique développé dans la partie 2.4 correspondent aux valeurs mesurées des débits massiques et des températures d'entrée pour chaque fluide, ainsi qu'à la température de l'environnement extérieur au CETP-NI et de ses caractéristiques géométriques. Sur ce dernier point, il faut noter que le modèle permet d'évaluer les échanges thermiques ayant lieu entre les trois fluides pour une configuration d'écoulement à contre-co-courant, ce qui correspond uniquement à la portion définie comme étant la longueur utile du CETP-NI.

Cette longueur utile, qui comprend la zone ailetée et celle des piquages sur l'air de ventilation, vaut ici 1650 mm (cf. Tableau 3.5 et Annexe 6), soit près de 85% des 1945 mm de longueur totale du conduit échangeur. Pour tenir compte des 15% de longueur restante correspondant aux zones situées en partie haute et basse du conduit, un modèle simple d'échangeur à contre courant entre les fumées et l'air de combustion est utilisé sur une longueur de 150 mm à chaque extrémité.

Dans le cas du CETP-NI n°3, la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux pouvant être obtenus avec le modèle mathématique n'est pas effectuée en raison d'une longueur utile d'échange trop faible et donc moins représentative avec seulement 870 mm, soit à peine 70% des 1245 mm de longueur totale du conduit échangeur. De plus, les conditions d'instrumentations ont été sensiblement améliorées entre les deux phases d'essai, donnant davantage de fiabilité aux résultats expérimentaux obtenus pour le CETP-NI n°4.

➤ Influence du passage de l'air de combustion

Les puissances cédées par l'air de combustion sont une nouvelle fois très faibles. Elles s'établissent ici autour de **40 W** à P1-V1, de **60 W** à P3-V3 et de **80 W** à P5-V5. Ces valeurs sont même légèrement inférieures à celles obtenues lors de l'essai précédent, ce qui nous pousse à étudier plus en détail ce qui se passe au niveau des échanges du côté de l'air de combustion.

Ainsi, quel que soit le régime de fonctionnement du poêle, les valeurs de température du Tableau 3.18 montrent qu'il n'y a que pour l'allure élevée de la VMC-DF que la température de l'air de combustion à la sortie du conduit échangeur est plus élevée que celle de l'air neuf de ventilation.

Tableau 3.18 : Températures d'air de combustion et d'air neuf de ventilation à la sortie du CETP-NI n°4

Allures de la VMC	Réduite			Normale			Élevée		
Régimes du poêle	P1-V1	P3-V3	P5-V5	P1-V1	P3-V3	P5-V5	P1-V1	P3-V3	P5-V5
$T_{ac, out\ CE} [^{\circ}C]$	36,2	45,8	50,9	37,1	43,4	50,3	35,0	42,0	48,4
$T_{anCE\ out} [^{\circ}C]$	41,4	54,3	62,1	39,1	47,6	56,1	34,5	41,7	48,3

Pour les allures réduite et normale de la VMC-DF, il existe donc une cote sur la hauteur du conduit échangeur où le flux de chaleur initialement cédé par l'air de combustion vers l'air de ventilation s'inverse et où c'est finalement l'air de ventilation qui cède de la chaleur à l'air de combustion. Ce phénomène d'inversion du flux de chaleur a été mis en évidence lors de l'étude paramétrique menée dans la partie 2.4.2. Ici, compte tenu des faibles différences de température qui existent entre les deux fluides, ce flux de chaleur reste très faible, ce qui tend à minimiser l'influence du phénomène sur les niveaux des puissances finalement échangées au sein du conduit échangeur.

Comme précédemment (cf. Figure 3.17), le graphique de la Figure 3.25 montre que la température de l'air de combustion décroît entre l'entrée et la sortie du conduit échangeur, puis qu'elle augmente rapidement au niveau de l'EDPA, avant de diminuer à nouveau fortement lors du passage du fluide dans le flexible métallique raccordé à la buse située derrière le poêle. En outre, les niveaux de température sont proches de ceux relevés lors des essais sur le CETP-NI n°3.

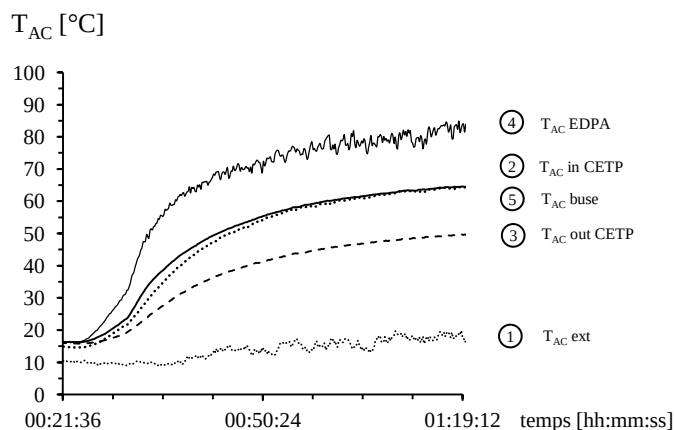


Figure 3.25 : Évolution de la température de l'air de combustion le long de la cheminée (CETP-NI n°4)

Suite aux essais, il apparaît que l'introduction d'un CETP-NI dans la colonne de cheminée ne modifie pas le rendement du poêle et qu'il est intéressant d'isoler le dernier élément de raccordement pour conserver une température d'admission d'air de combustion élevée.

➤ Puissances disponibles en entrée du CETP-NI n°4

Les deux graphiques de la Figure 3.26 montrent que les puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion sont légèrement supérieures à celles des essais sur le CETP-NI n°3. En effet, elles dépendent peu des caractéristiques du conduit échangeur, mais principalement de celles du poêle à granulés dont les réglages ont été conservés. Les différences observées sont principalement dues aux légères variations des conditions d'essai et au fait que la température des fumées de combustion en entrée du CETP-NI n°4 est un peu plus élevée que lors des essais précédents (cf. Figure 3.23).

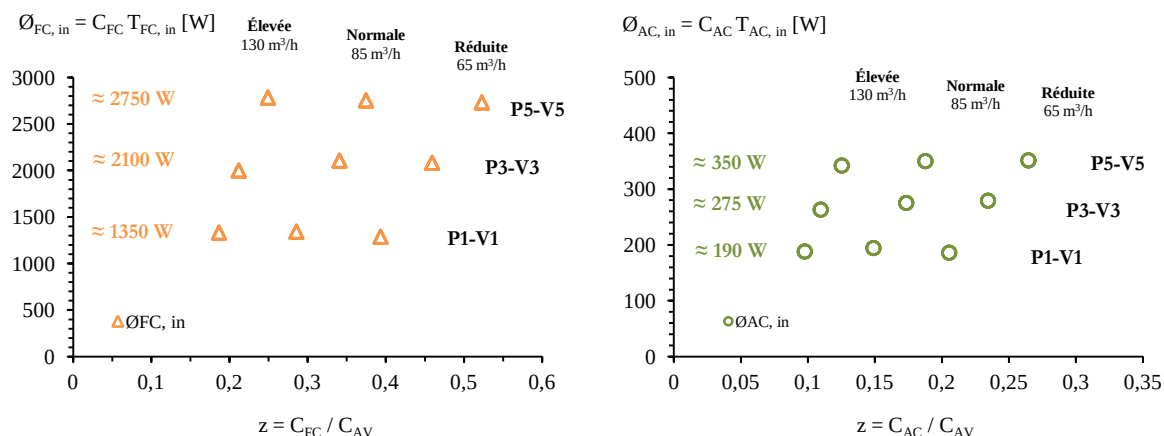


Figure 3.26 : Puissances disponibles sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°4)

➤ Puissances maximum récupérables au sein du CETP-NI n°4

Le graphique de la Figure 3.27 donne les valeurs de la puissance maximum récupérable par l'air de ventilation au sein du CETP-NI n°4. Elle vaut ici environ 1200 W à P1-V1, 2000 W à P3-V3 et 2700 W à P5-V5. On observe une nouvelle fois que ces valeurs sont très légèrement supérieures à celles déterminées lors des essais précédents et que les différents régimes de fonctionnement du poêle à granulés sont clairement identifiés. L'incertitude de mesure sur la puissance maximum récupérable par l'air neuf de ventilation est inférieure ou égale à 19,4%.

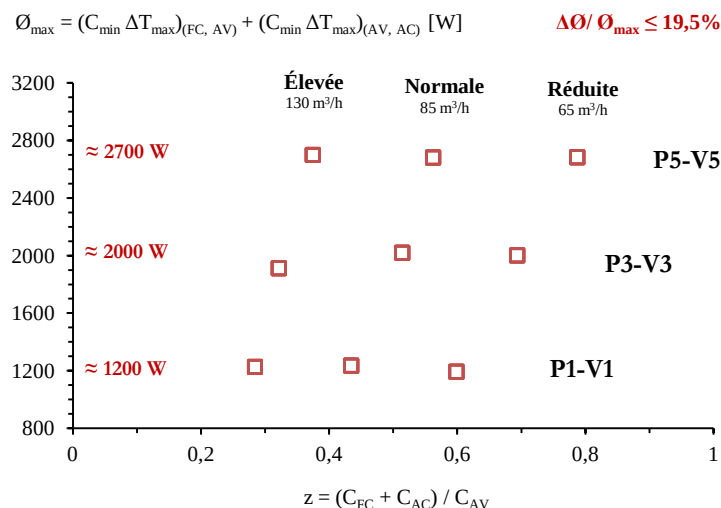


Figure 3.27 : Puissances maximum récupérables sur l'air de ventilation (CETP-NI n°4)

Les deux graphiques de la Figure 3.28 permettent de détailler les puissances maximum récupérables par l'air de ventilation respectivement du côté des fumées et de l'air de combustion, en fonction des différents régimes de fonctionnement du poêle et de la VMC-DF. La puissance maximum récupérable du côté de l'air de combustion $\dot{Q}_{\max AC \rightarrow AV}$ est ici comprise entre 90 et 200 W environ, ce qui représente moins de 8% de la totalité de la puissance maximum récupérable. Comme pour les essais précédents, l'essentiel du potentiel de récupération de la chaleur sur l'air de ventilation est donc localisé du côté des fumées de combustion.

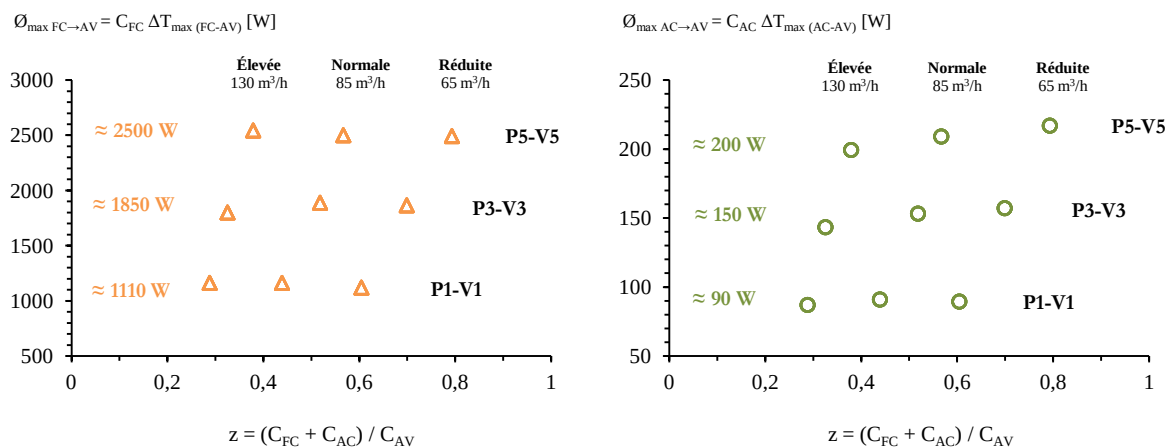


Figure 3.28 : Puissances maximum récupérables sur les fumées et sur l'air de combustion (CETP-NI n°4)

➤ Efficacité de l'échange au sein du CETP-NI n°4

Le graphique de la Figure 3.29 donne les valeurs expérimentales de l'efficacité de l'échange E_{exp} au sein du CETP-NI n°4 en fonction du rapport adimensionnel z pour les trois régimes de fonctionnement du poêle. Lors de ces essais, l'incertitude sur l'efficacité de l'échange (cf. Annexe 2 pour la méthodologie d'évaluation et Annexe 5 pour les valeurs calculées) est inférieure ou égale à 28,6%, comme cela est représenté sur le graphique par les courbes pointillées haute et basse encadrant la courbe de tendance, sur laquelle les valeurs expérimentales apparaissent être bien positionnées.

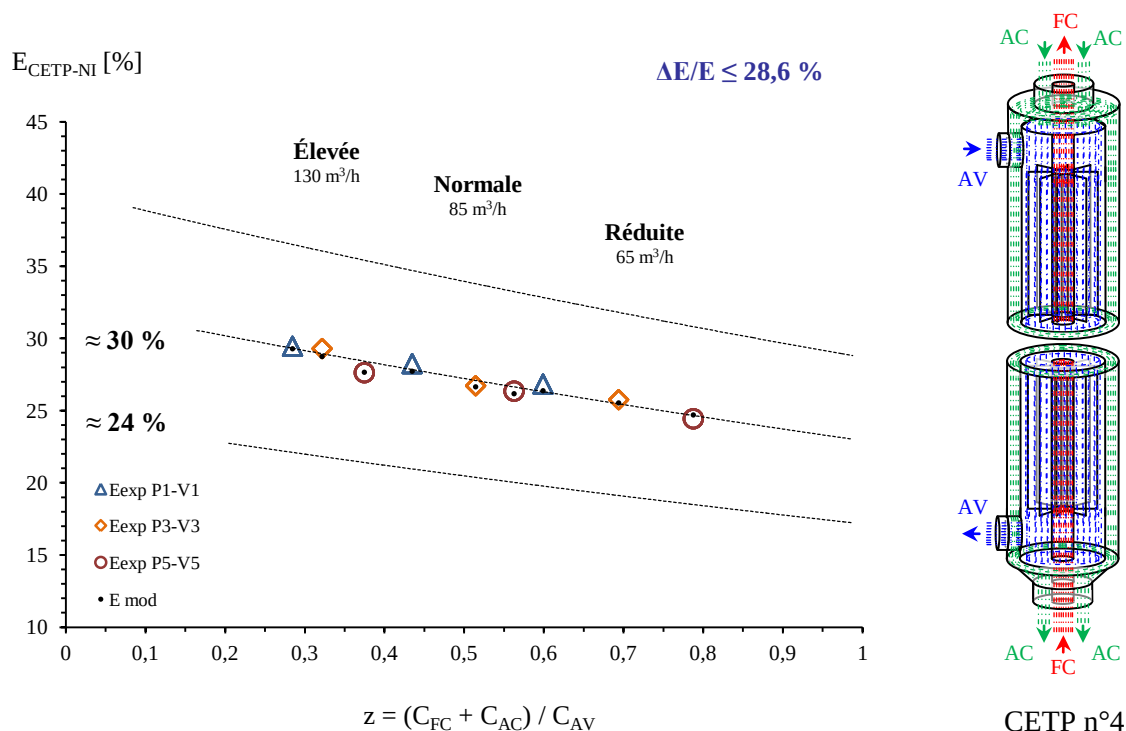


Figure 3.29 : Efficacité de l'échange au sein du CETP-NI n°4

L'efficacité de l'échange au sein du CETP-NI n°4 s'établit entre **24 et 31 %** environ sur la plage des débits d'air de ventilation circulant dans le prototype. Les valeurs d'efficacité E_{mod} obtenues à l'aide du modèle de CETP-NI sont également représentées sur le graphique de la Figure 3.29. La correspondance avec les valeurs expérimentales est une nouvelle fois très encourageante, avec un écart relatif entre les valeurs mesurées et calculées inférieur à 2% et qui correspond à l'écart relatif sur l'évaluation des puissances récupérées par l'air de ventilation (cf. Annexe 6).

La plus faible valeur d'efficacité est obtenue pour l'allure réduite de la VMC-DF et le régime P5-V5 du poêle à granulés, tandis que la valeur d'efficacité la plus forte est obtenue pour l'allure élevée de la VMC-DF et le régime P1-V1 de l'appareil de chauffage au bois. Pour le prototype n°4, ces efficacités minimales et maximales valent respectivement 24,4% et 29,5%, contre seulement 19,2% et 22,1% pour le prototype n°3 (cf. Figure 3.21 et Annexe 4), soit une augmentation de l'efficacité de l'échange de plus de **5 points** entre les deux prototypes de CETP-NI.

L'efficacité de l'échange au sein des CETP-NI peut encore paraître assez faible, mais il faut rappeler qu'il est nécessaire de ne pas épuiser le potentiel thermique des fumées pour qu'elles puissent être évacuées correctement, mais aussi réchauffer l'air de combustion dans les éléments de conduit situés au-dessus du conduit échangeur.

➤ Puissances récupérées et efficacité de l'échange au sein de la VMC-DF

Le graphique de la Figure 3.30 donne les puissances récupérées sur l'air neuf $\dot{Q}_{AN}$ et celles cédées par l'air extrait $\dot{Q}_{AE}$ au niveau de la VMC-DF, ainsi que les valeurs des puissances maximum récupérables sur l'air neuf $\dot{Q}_{max DF}$ lors des essais sur le système combiné équipé du CETP-NI n°4. Ici encore, ces résultats sont obtenus pour les trois allures de la centrale de ventilation et pour les trois principaux régimes de fonctionnement du poêle à granulés à combustion étanche.

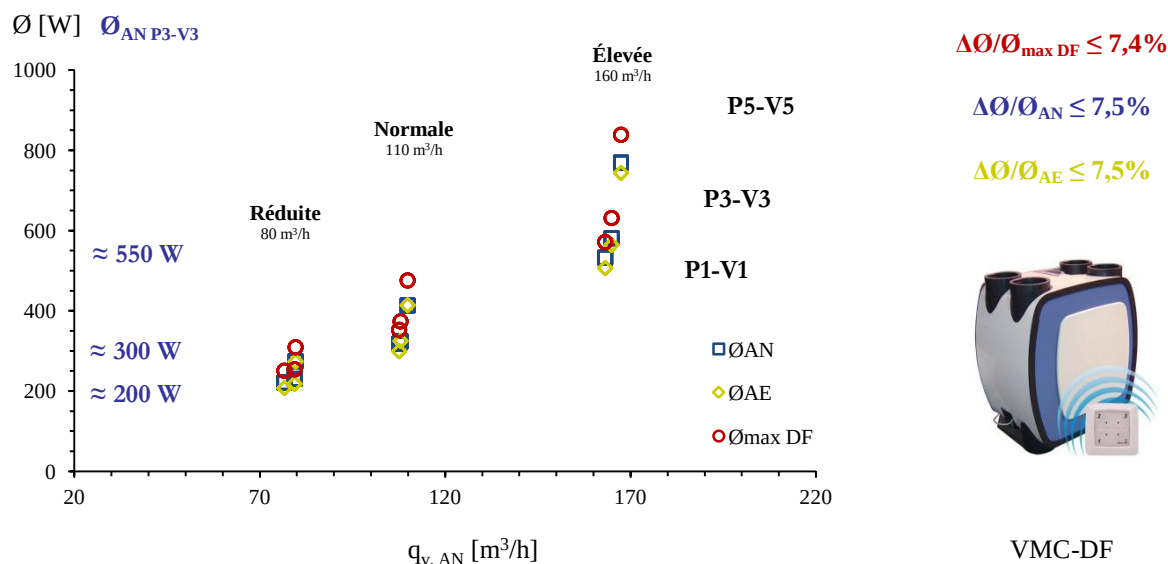


Figure 3.30 : Puissances transférées et maximum récupérables dans la VMC-DF (CETP-NI n°4)

L'essai sur le système combiné équipé du CETP-NI n°4 étant réalisé au mois de mai, la température de l'air neuf prélevé à l'extérieur est déjà comprise entre 16 et 18°C environ. La puissance récupérée ensuite par l'air neuf au sein de l'échangeur de la VMC-DF est ainsi comprise entre 200 W et 750 W, ce qui est moins important que lors des essais précédents réalisés en mars sur le système combiné équipé du CETP-NI n°3. L'incertitude de mesure sur ces valeurs est inférieure à 7,5%.

Lors de cet essai, le défaut de mesure du débit d'air extrait semble avoir été corrigé, cependant on observe que les puissances récupérées par l'air neuf restent très légèrement supérieures à celles cédées par l'air extrait. Le bilan sur les puissances échangées au sein de la VMC-DF peut toutefois être considéré comme vérifié, avec des incertitudes de mesure qui restent ici inférieures à 7,5%. Enfin, les puissances récupérées par l'air neuf sont une nouvelle fois très proches des puissances maximum récupérables au sein de la VMC-DF, d'où la très bonne efficacité de cet échange qui s'établit entre 86,7% et 93,2% comme indiqué dans le Tableau 3.19.

Tableau 3.19 : Efficacité de l'échange au sein de la VMC-DF (système combiné avec le CETP-NI n°4)

Efficacité de la VMC-DF		Régime de fonctionnement du poêle à granulés		
Allure VMC-DF	Débit d'air neuf	P1-V1	P3-V3	P5-V5
Réduite	80 m³/h	88,2%	90,6%	88,7%
Normale	110 m³/h	90,0%	86,7%	86,9%
Élevée	160 m³/h	93,2%	92,0%	91,7%

3.2.4. Éléments de comparaison

➤ Puissances échangées

Le Tableau 3.20 présente les valeurs des puissances échangées au niveau du système combiné avec les prototypes de CETP-NI n°3 et n°4 pour un même fonctionnement du poêle au régime P5-V5 et pour un même débit d'air de ventilation d'environ 130 m³/h circulant dans le conduit échangeur, soit un fonctionnement de la VMC-DF à allure élevée.

Tableau 3.20 : Comparaison des puissances échangées pour tous les fluides au sein du système combiné

Régime P5-V5		c_p	ρ	q_v	q_m	C	T_{in}	T_{out}	ΔT	$\emptyset$	$\Delta\emptyset/\emptyset$
Allure élevée		[J/kg.K]	[kg/m ³]	[m ³ /h]	[g/s]	[W/K]	[°C]	[°C]	[°C]	[W]	[%]
CETP-NI n°3	FC	1090	0,7	44	9,0	9,9	263,8	214,3	49,5	489	9,2
	AC	1008	1,0	17	4,9	4,9	71,6	49,5	22,2	109	6,2
	AV	1007	1,1	131	40,7	41,0	25,2	37,9	12,7	521	6,5
	AN _{DF}	1007	1,2	201	69,4	69,9	9,8	25,1	15,3	1072	5,1
	AE _{DF}	1007	1,2	-	-	-	26,1	15,3	10,8	-	-
CETP-NI n°4	FC	1094	0,7	44	8,9	9,7	285,9	214,9	71,0	692	8,9
	AC	1008	1,0	17	4,9	4,9	70,0	48,4	21,6	106	6,3
	AV	1007	1,1	129	38,7	39,0	29,2	48,3	19,1	745	5,9
	AN _{DF}	1007	1,2	167	56,5	56,9	15,6	29,1	13,5	770	5,4
	AE _{DF}	1007	1,2	208	68,7	69,2	30,3	19,6	10,8	744	5,7

D'après les valeurs du Tableau 3.20, on constate qu'il existe une amélioration des performances du CETP-NI dans sa version n°4 par rapport au prototype n°3, avec 745 W récupérés sur l'air ventilation circulant dans le conduit échangeur contre 521 W précédemment. Ces valeurs dépendent bien sûr des conditions d'essai et doivent donc être relativisées, mais elles donnent une idée générale des performances du système combiné. À ce titre, c'est à chaque fois un peu plus de 1500 W qui sont récupérés sur l'air neuf de ventilation lorsqu'on additionne les performances de la VMC-DF et du CETP-NI.

On peut également retenir que l'incertitude sur les puissances échangées est globalement comprise entre 5 et 10%, tant au niveau du CETP-NI qu'au niveau de la VMC-DF, ce qui permet d'avoir un bon niveau de confiance dans les valeurs expérimentales. L'incertitude sur l'efficacité de l'échange est souvent près de trois fois plus élevée car son calcul fait intervenir la somme des incertitudes sur la puissance utile récupérée et sur la puissance maximum récupérable, comme cela est détaillé en Annexe 2.

Pour les allures normales et réduite de la VMC-DF, il n'est pas possible d'effectuer directement la comparaison des puissances récupérées par l'air de ventilation au sein des CETP-NI n°3 et n°4, car les débits qui y circulent présentent des différences trop importantes.

Il existe néanmoins deux configurations pour lesquelles on retrouve des débits semblables sur l'air de ventilation circulant dans les CETP-NI. Cela correspond à des valeurs qui s'établissent autour de 130 m³/h et de 85 m³/h. Le Tableau 3.21 donne ainsi les puissances récupérées par l'air de ventilation au sein des CETP-NI n°3 et n°4 pour les trois principaux régimes de fonctionnement du poêle à granulés et pour les deux cas où un même débit volumique d'air de ventilation circule dans le conduit échangeur. Les allures de fonctionnement de la VMC-DF sont à chaque fois précisées.

Tableau 3.21 : Comparaison des puissances récupérées par l'air au sein des CETP-NI n°3 et n°4

Puissance récupérée par l'air $\dot{Q}_{AV}$ [W]		Régime de fonctionnement du poêle		
CETP-NI	Allure VMC DF [m ³ /h]	P1-V1	P3-V3	P5-V5
n°3	Élevée 130 m ³ /h	237	377	521
n°4	Élevée 130 m ³ /h	361	560	745
n°3	Réduite 85 m ³ /h	227	363	492
n°4	Normale 85 m ³ /h	349	539	706

D'après les valeurs du Tableau 3.21, on remarque que l'allongement du conduit échangeur de 1245 mm à 1945 mm entre le CETP-NI n°3 et n°4, a permis d'**accroître d'environ 50% la valeur de la puissance récupérée par l'air de ventilation** pour chaque régime de fonctionnement du poêle à granulés et aussi bien pour un débit d'air de 85 m³/h que de 130 m³/h. Les valeurs exactes s'établissent autour de 43% à P5-V5, 48,5% à P3-V3 et 53% à P1-V1. Ces nouvelles performances permettent de confirmer l'intérêt du prototype n°4.

➤ Débit d'air de combustion prélevé par le poêle à combustion étanche

Le Tableau 3.22 donne les valeurs des débits volumiques et massiques d'air de combustion prélevé par le poêle à combustion étanche lors des essais en laboratoire sur le CETP-NI n°3 et n°4. On observe que les débits massiques prélevés sont identiques avec les deux prototypes, ce qui signifie que l'allongement du conduit échangeur n'a pas modifié les conditions admission d'air de combustion au niveau du poêle, i.e. que les pertes de charge sont restées sensiblement équivalentes.

Tableau 3.22 : Comparaison des débits volumiques et massiques d'air de combustion prélevés par le poêle

Régime de fonctionnement du poêle			P1-V1	P3-V3	P5-V5
CETP-NI n°3	$q_{v, AC}$	[m ³ /h]	12,7	14,6	17,2
	$q_{m, AC}$	[g/s]	3,9	4,3	4,9
CETP-NI n°4	$q_{v, AC}$	[m ³ /h]	13,0	15,3	17,3
	$q_{m, AC}$	[g/s]	3,9	4,4	4,9

3.2.5. Éléments de conclusion

En conclusion des essais menés en laboratoire sur le système combiné équipé successivement des prototypes de CETP-NI n°3 et n°4, on rappelle les principaux résultats obtenus :

- ⇒ L'utilisation d'un poêle à granulés de bois à **combustion étanche** est une condition sine qua non pour obtenir un fonctionnement correct du système combiné. Ce type d'appareil est amené à connaître un fort développement dans les prochaines années. Un poêle étanche d'une puissance nominale de 9 kW a été utilisé lors des essais en laboratoire, mais une version moins puissante de 6 kW semble mieux adaptée aux exigences des habitations de type BBC.
- ⇒ Le positionnement du conduit échangeur **au plus près de la buse** d'évacuation des fumées du poêle et **en aval de la VMC-DF** est validé. En effet, le potentiel de récupération de chaleur y est le plus élevé et l'air neuf de ventilation circule **en pulsion** dans le conduit échangeur en bénéficiant de la filtration et de la régulation effectuée par l'unité de ventilation à double flux, le tout sans risque d'être mélangée aux fumées ou à l'air de combustion.
- ⇒ Les bons résultats obtenus lors des **tests d'étanchéité** sur le prototype n°4 permettent de valider le processus industriel de fabrication de cet élément entièrement compatible avec la gamme de conduits étanches du constructeur et qui garantit à la fois le **bon fonctionnement** du poêle à granulés auquel il est raccordé ainsi que la **sécurité complète** des occupants. De plus, les efforts réalisés pour **limiter les pertes de charge** introduites sur l'air de ventilation par le conduit échangeur le rendent directement **intégrable** dans un réseau de ventilation, en tant qu'élément statique situé en aval d'un ventilateur de soufflage.
- ⇒ Les puissances récupérées par l'air de ventilation au sein du conduit échangeur s'établissent entre 200 et 500 W environ pour le prototype n°3 et entre 300 et 750 W environ pour le prototype n°4. De manière plus générale, avec un poêle d'une puissance nominale de 6 kW, on s'attend à récupérer sur l'air une puissance d'environ 300 W avec une efficacité de 20% pour le prototype n°3 et une puissance d'**environ 500 W avec une efficacité de 25% pour le prototype n°4**.
- ⇒ **Un calcul simplifié** permet de vérifier que la puissance récupérée par l'air de ventilation au sein du conduit échangeur (autour de 500 W) est suffisante pour répondre aux déperditions par renouvellement d'air en hiver des habitations de type BBC équipés d'une VMC-DF à haut rendement. En effet, avec une température extérieure prise à -10°C et intérieure à +20°C, soit un écart de 30°C, et avec un débit d'air neuf réglementaire compris entre 60 et 240 m³/h, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air s'établissent entre 600 et 2500 W environ. Ensuite, en tenant compte d'un rendement de la VMC-DF supérieur à 80%, l'appoint de chauffage nécessaire permettant de couvrir les pertes par renouvellement d'air est bien compris entre **120 et 500 W**.
- ⇒ De manière générale, **l'incertitude sur les mesures expérimentales et sur nos calculs est jugée acceptable**, car elle se situe autour de 10% sur la puissance récupérée par l'air de ventilation et s'établit autour de 30% en ce qui concerne l'efficacité de l'échange.
- ⇒ **Le bon accord** entre les valeurs expérimentales et celles du modèle de CETP-NI sur les puissances transférées et l'efficacité de l'échange au sein du prototype n°4 permet d'établir la **validation des solutions analytiques développées dans la partie 2.4**.
- ⇒ La **faible valeur d'efficacité** obtenue avec le conduit échangeur **doit être relativisée**, car même si la puissance récupérée sur l'air de ventilation peut encore être augmentée par rapport au potentiel disponible sur les fumées et l'air de combustion, il faut s'assurer avant tout que les fumées conservent suffisamment de chaleur pour être évacuées correctement sans risquer de condenser, car elles permettent également de réchauffer l'air de combustion.
- ⇒ Même avec l'introduction d'un CETP, l'air de combustion conserve une **température d'admission élevée** qui **favorise le rendement** de l'appareil. Son rôle au sein du conduit échangeur est également important, car même s'il transmet peu de chaleur à l'air de ventilation, il lui permet surtout de ne pas en perdre en agissant comme une **zone tampon** vis-à-vis de l'extérieur. L'isolation du CETP ne présente pas d'intérêt s'il est situé dans le volume chauffé.

Le prototype n°4 de conduit échangeur représente donc **un compromis intéressant** entre faisabilité industrielle, intégrabilité aux éléments existants et performance de récupération de chaleur. C'est enfin et surtout un élément qui reste simple, robuste et qui apporte une valeur ajoutée à l'installation de chauffage sans faire aucun compromis sur la sécurité. En ce sens, **il répond tout à fait aux différents critères du cahier des charges** élaboré au début du projet (cf. Tableau 2.2).

La Figure 3.31 propose une vue en fonctionnement du système combiné de ventilation et de chauffage au bois équipé du CETP-NI n°4 dans les locaux du CERIC. Ce montage expérimental a permis de valider la configuration de couplage et les performances du système combiné de ventilation et de chauffage au bois pour des habitations de type BBC.



Figure 3.31 : Vue du banc d'essai du système combiné équipé du CETP-NI n°4

Le poster situé sur le côté droit de la vue donnée par la Figure 3.31 est également présenté de manière plus visible en Annexe 7. Il s'agit d'un outil de communication sur le projet mené durant ce travail de thèse et qui a abouti au développement d'un système intégré de ventilation et de chauffage au bois pour les bâtiments à basse consommation d'énergie, acronyme SICHABO.

Il permet de souligner le partenariat qui s'est établi sur ce projet entre trois industriels (PALAZZETTI pour le poêle à granulés à cycle de combustion étanche, VIM ou UNELVENT pour l'unité de ventilation à double flux à haut rendement et POUJOULAT pour le conduit de cheminée concentrique intégrant un prototype innovant de conduit échangeur à triple paroi), deux laboratoires (le CERIC comme structure d'accueil pour les essais et le LEPTIAB comme structure principale pour la direction du projet) et un bailleur social (SIPEA habitat pour la mise à disposition de deux logements en vue d'essais in situ). En effet, parallèlement aux derniers essais menés en laboratoire, le système combiné de ventilation et de chauffage au bois équipé du CETP-NI n°4 est installé sur site dans deux logements près de Poitiers, comme cela est détaillé dans la partie suivante.

3.3. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION SUR SITE

3.3.1. Présentation du projet Vecteur Air Bois

Le projet Vecteur Air Bois associe la volonté d'un bailleur social (SIPEA Habitat) aux compétences d'un laboratoire de recherche (LEPTIAB) et de trois industriels (VIM, PALAZZETTI et POUJOULAT) pour intégrer un système innovant de ventilation et de chauffage au bois à récupération de chaleur sur les fumées dans des logements à basse consommation d'énergie.

➤ Contexte

Le projet Vecteur Air Bois s'inscrit dans le cadre d'une opération de construction de 11 logements à Fontaine le Comte (86) menée par SIPEA Habitat, qui est un bailleur engagé dans une démarche globale de promotion et de développement d'un habitat social à basse consommation d'énergie et à coût maîtrisé.

Les 11 logements du projet sont répartis sur trois bâtiments au principe constructif mixte bois et béton, bardés de bois et recouverts d'une toiture végétalisée. Aux extrémités de la parcelle, les bâtiments A et C sont identiques et comprennent chacun deux logements de type T2 et deux logements de type T5. Au centre, le bâtiment B comprend également deux T2, mais un seul T5. L'ensemble du projet totalise ainsi 6 T2, 5 T5, 12 celliers extérieurs et 22 places de parking. La Figure 3.32 donne le plan de masse et deux représentations 3D du projet.



Figure 3.32 : Plan de masse et vues 3D du projet de construction de 11 logements à Fontaine le Comte

➤ Objectif

Le but du projet Vecteur Air Bois est d'étudier la faisabilité et d'évaluer les performances in situ (LEPTIAB) d'un système associant une VMC-DF à haut rendement (VIM), un poêle à granulés de bois étanche de petite puissance (PALAZZETTI) et un conduit échangeur à récupération de chaleur sur les fumées de combustion (POUJOLAT).

Le système combiné de ventilation et de chauffage au bois devra à la fois garantir le confort des occupants et la qualité de l'air à l'intérieur des habitations, en utilisant uniquement le vecteur air pour assurer le chauffage. Le suivi de l'installation doit permettre d'évaluer les performances du système et son acceptabilité par les occupants. Enfin, l'expérimentation sur site doit permettre de comparer les performances et les consommations d'énergie du système, ainsi que le confort ressenti par les occupants, dans le cas où l'habitation est équipée ou non d'un conduit échangeur.

➤ Retour d'expérience sur une opération similaire

Pour bénéficier d'un premier retour d'expérience, une enquête préliminaire a été menée début mars 2010 auprès des locataires de deux logements sociaux à basse consommation d'énergie à La Chapelle St-Laurent (79). Un des logements est de type T3 et l'autre de type T4. Ils sont tous deux équipés d'un poêle à granulés et d'une VMC-DF à haut rendement. Cette opération de construction conduite par l'OPAC HLM Nord Deux-Sèvres a été réceptionnée en juillet 2007. Comme les locataires interrogés occupent les logements depuis le début, ils y ont donc passé trois hivers. Entre autres, ce retour d'expérience a permis de mettre en évidence l'importance du soin apporté lors de l'installation des différents équipements techniques, en particulier lors du traitement de l'acoustique de la VMC-DF. Le détail des conclusions de l'enquête est donné en Annexe 8.

➤ Choix des logements étudiés

On choisit d'instrumenter pendant l'hiver 2010-2011 les trois T5 situés à l'extrémité des différents bâtiments, comme indiqué sur la Figure 3.33. Ces trois logements possèdent en effet une orientation et une surface d'exposition à l'extérieur qui sont semblables. Les logements I et J sont équipés d'un conduit échangeur à récupération de chaleur sur les fumées pour réchauffer la partie de l'air neuf de ventilation qui est soufflée dans les chambres. Le logement K ayant un placard technique trop étroit pour y placer un conduit échangeur sert quant à lui de référence en étant également équipé d'un poêle à granulés et d'une VMC-DF, mais sans intégrer de conduit échangeur dans la cheminée.

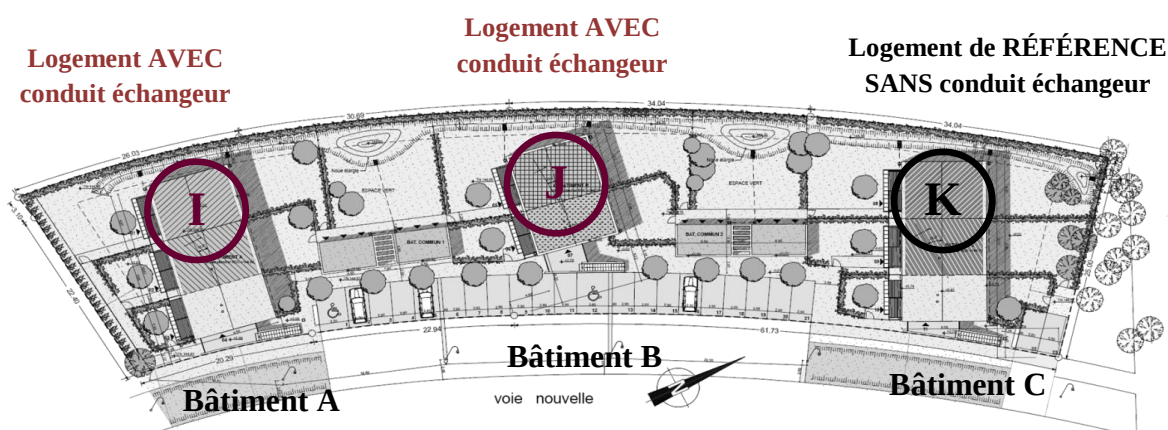


Figure 3.33 : Repérage des trois logements de type T5 étudiés sur le plan de masse du projet

Les trois T5 instrumentés sont réalisés en R+1. Ils possèdent une surface de 105 m² et un volume de 260 m³ environ avec une communication importante entre les pièces principales. En effet, la cuisine est ouverte sur la partie séjour qui elle-même comprend l'escalier menant au dégagement haut à l'étage. Cette configuration décloisonnée favorise la bonne répartition de la chaleur dans le logement qui ne possède pas d'autre appareil de chauffage qu'un poêle à granulés de bois situé en bas dans le séjour, à l'exception d'un sèche serviette électrique dans la salle de bain à l'étage.

3.3.2. Installation du système combiné sur site

➤ Description du système combiné et de ses différents composants

La Figure 3.34 donne le schéma de principe du système combiné tel qu'il est installé dans les deux logements I et J sur site. Il s'agit du même schéma de principe que celui utilisé lors des essais sur le système combiné en laboratoire et qui a déjà été présenté dans la partie 3.1. Le schéma détaillé de l'implantation du réseau de ventilation dans ces deux T5 est donné en Annexe 9.

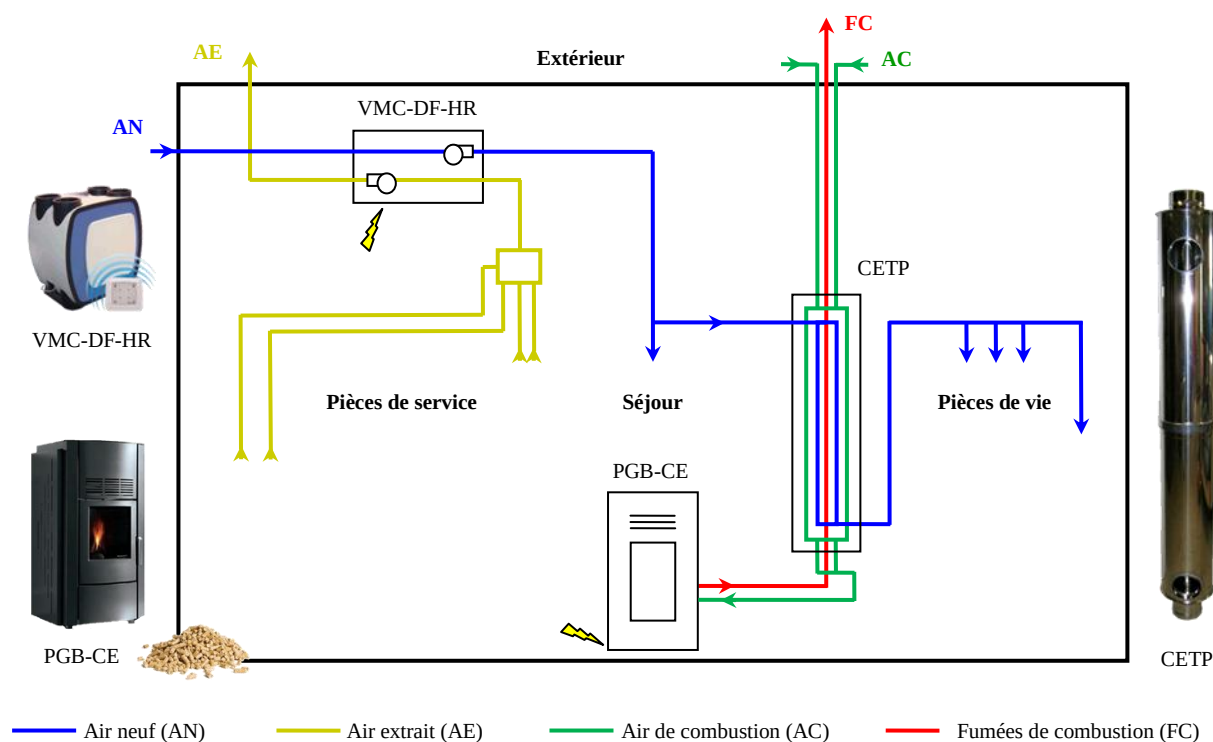


Figure 3.34 : Schéma de principe du système intégré de ventilation et de chauffage au bois

Après avoir récupéré des calories sur l'air extrait au sein de l'échangeur de la VMC-DF à haut rendement (VMC-DF-HR), une petite partie de l'air neuf de ventilation est directement soufflée dans le séjour, tandis qu'en grande majorité, il circule et se réchauffe à l'intérieur du dernier prototype de conduit échangeur à triple paroi (CETP) intégré à la cheminée du poêle à granulés de bois à cycle de combustion étanche (PGB-CE) avant d'être distribué dans les différentes chambres de l'habitation.

Disponible à la commercialisation en France depuis le mois d'avril 2010, le poêle installé dans les logements est le modèle ELENA MINI du fabricant PALAZZETTI. C'est un appareil en tout point semblable au modèle ELENA NEW utilisé lors des essais en laboratoire à la seule exception que sa puissance nominale n'est pas de 9 kW, mais de 6 kW.

➤ Détails de mise en œuvre

Positionnement du conduit échangeur

Comme le montre la Figure 3.34, le conduit échangeur fonctionne en pulsion sur l'air neuf, sans ajout de ventilateur supplémentaire, car il est positionné en aval de la VMC-DF qui pour sa part ne présente alors aucun risque de surchauffe au niveau de son échangeur et conserve un mode de fonctionnement habituel en assurant la régulation du renouvellement d'air dans l'habitation. Le conduit échangeur est placé au plus près du poêle à granulés pour bénéficier des températures de fumées les plus élevées, donc du plus fort potentiel de récupération de chaleur. L'entrée de l'air de ventilation s'effectue de préférence par le piquage haut du conduit échangeur pour que l'air de ventilation échange à contre courant des fumées.

Compte tenu des divers raccords ayant lieu au niveau du conduit échangeur, il est important d'un point de vue esthétique qu'il soit placé dans un placard technique derrière le poêle.

La Figure 3.35 donne une vue de l'encombrement de l'espace technique prévu pour contenir le CETP de diamètre extérieur 230 mm. On note qu'il est possible de faire passer des gaines de ventilation de diamètre 150 mm autour du CETP même si les piquages sont en 125 mm. Une réservation de dimensions 350 mm, 600 mm et 700 mm permet donc l'implantation des différents éléments.

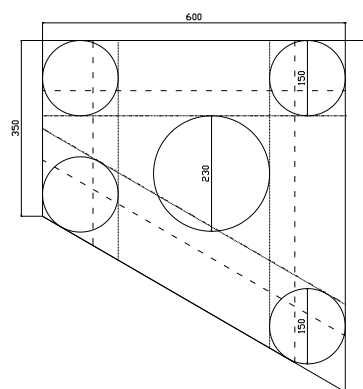


Figure 3.35 : Vue en coupe de l'encombrement du placard technique (dimensions en mm).

Écart au feu et traversée de paroi

Le poêle doit être distant de tout matériau combustible d'au moins 20 cm. Dans notre cas, il cette distance est réduite car le matériau en face arrière du poêle est classé M0 donc incombustible. Pour la traversée d'un conduit de raccordement à travers plusieurs locaux, les NF DTU 24.1 « travaux de fumisterie » et NF DTU 24.2 « travaux d'âtrerie » ne sont pas applicables pour les conduits concentriques d'admission d'air et d'évacuation des fumées desservant les poêles à granulés de bois.

L'étanchéité à l'air au niveau de la traversée en toiture est réalisée en déposant un joint coupe feu entre le Siporex et la paroi extérieure du conduit de cheminée. Conformément aux règles de l'art, le conduit dépasse de 40 cm la hauteur du faîtage confondue ici avec la hauteur de la toiture terrasse.

Le conduit de cheminée étanche DUALIS PGI, développé par POUJOULAT est considéré comme non traditionnel. Il convient alors de respecter le Document Technique d'Application (DTA) validé par le GS 14 du CSTB le 30 Septembre 2008 et la révision de l'Avis Technique n°14/05-961.

La distance de sécurité de 10 cm dont il est question dans le DTA est applicable dans les cas où il y a présence de matériaux combustibles ou dégradables sous l'action de la chaleur avoisinant le conduit d'évacuation des fumées. Cette distance est donc respectée lors de la traversée des planchers. De la même façon, comme les parois des gaines techniques sont composées de matériaux conventionnels classés M1, cette distance de sécurité doit également être respectée.

Détecteur Avertisseur Autonome de Fumées (DAAF)

La loi rendant obligatoire l'installation d'un détecteur avertisseur autonome de fumée dans tous les lieux d'habitation est adoptée [Loi_DAAF, 2010] pendant la phase de chantier de l'opération de construction. Le permis de construire de l'opération de construction ayant été accepté avant cette date, nous n'avons pu que fortement encourager le bailleur à installer ce type d'appareils dans chaque logement, mais il revient finalement aux locataires intéressés de s'équiper à leurs frais.

Historique de l'installation

La VMC-DF et les conduites rigides constituant le réseau de ventilation sont installées dès l'hiver 2009 de manière à pouvoir refermer les caissons et faux plafonds qui reçoivent ces éléments.

Des régulateurs de débit de 45 m³/h pour le séjour et de 30 m³/h pour les chambres sont placés dans les conduites rigides à 50 cm environ derrière les bouches de soufflage pour limiter l'impact du jet d'air sur les grilles conformément aux conclusions du retour d'expérience détaillé en Annexe 8. La commande des différentes allures de la VMC-DF, initialement placée dans le local technique à l'étage, est déplacée dans la cuisine pour en faciliter l'utilisation. Le branchement de la VMC-DF s'effectue au niveau d'une prise située dans le tableau électrique et sur laquelle est installé un enregistreur de consommation. Un second enregistreur est placé sur la prise d'alimentation du poêle à granulés.

Disponibles à la commercialisation en France à partir d'avril 2010, les poêles à granulés à combustion étanche ELENA MINI du fabricant italien PALAZZETTI sont livrés sur le chantier à la mi-avril 2010. Les premiers travaux d'installation du système complet ont donc commencé à cette période, avec le raccordement du poêle à granulés au conduit de cheminée étanche puis au CETP.

Un té de distribution est placé en amont du raccordement du conduit échangeur au réseau de ventilation pour qu'une partie de l'air neuf de ventilation soit directement soufflée dans le séjour après son passage dans l'échangeur de la VMC-DF, comme indiqué sur le schéma de la Figure 3.34. Un soin particulier est apporté à cette réalisation de manière à ne pas créer de point bas dans le réseau.

L'installation du système complet est finalisée à la fin du mois de mai pour le premier logement I et à la mi-juin pour le second J. Comme expliqué précédemment, une attention toute particulière est portée lors de la réalisation lorsque les conduits doivent traverser des cloisons ou des planchers de manière à respecter les différentes exigences liées à l'écart au feu et à l'étanchéité.

La Figure 3.36 propose une vue générale du bâtiment A prise à la mi-juillet 2010 au moment de l'entrée des premiers locataires dans les logements. Des vues détaillées des différents composants du système combiné sont également proposées sur la Figure 3.36. Ces photographies ont été prises à la fin juin 2010 lors de l'essai de fonctionnement du système combiné de ventilation et de chauffage au bois installé dans les deux T5 (I et J) situés aux extrémités des bâtiments A et B.

De façon détaillée, on y voit le poêle à granulés en fonctionnement au cœur de la pièce de vie principale. Puis, derrière le poêle, le local technique du rez-de-chaussée dans lequel est raccordé le conduit concentrique de cheminée permettant l'évacuation des fumées et l'admission d'air de combustion, incluant également le prototype n°4 de CETP. Ce dernier est lui-même raccordé au réseau de ventilation de la VMC-DF située dans le local technique de l'étage. Enfin, le terminal du conduit de cheminée s'élève au dessus de la toiture terrasse.



Figure 3.36 : Vue d'un bâtiment et des différents composants du système combiné installé sur site

Inauguration

Après une modification profonde de l'opération initiale qui se trouvait en échec et prévoyait la réalisation de 11 maisons individuelles, le projet de Fontaine le Comte est finalement mené à terme par le bailleur avec les mêmes acteurs, mais en suivant une démarche plus participative et transversale pour aboutir à de meilleures performances énergétiques et économiques. En effet, dans sa forme initiale, le projet visait l'obtention du label THPE, mais c'est finalement le label BBC-Effinergie qui est obtenu sur cette opération, avec une baisse du coût de construction de 1500€ à 1100 € HT/m² de surface utile. Une fiche technique récapitulative des principales caractéristiques de l'opération de construction des 11 logements à Fontaine le Comte est donnée en Annexe 10.

L'inauguration des logements a eu lieu le 13 octobre 2010. Puis, diverses opérations de promotion et de communication ont été menées et ont notamment permis de souligner l'intérêt et l'originalité du partenariat réalisé dans le cadre du projet Vecteur Air Bois. Une revue de presse de l'inauguration de l'opération est proposée en Annexe 11. Cependant, aucune visite réunissant les acteurs du projet Vecteur Air Bois n'a été organisée sur le site. Il serait pourtant intéressant que chacun puisse juger de l'installation du système combiné et de son comportement en fonctionnement. Ce serait également l'occasion d'échanger avec les locataires et d'obtenir un retour d'expérience sur leur condition d'utilisation du système combiné de ventilation et de chauffage au bois.

➤ **Essai de fonctionnement**Débits volumiques de ventilation

Les Tableaux 3.23 et 3.24 donnent les débits volumiques moyens de ventilation obtenus respectivement dans les différentes pièces des logements I et J. Les mesures sont réalisées à chaque bouche de ventilation avec un cône équipé d'un fil chaud. Les potentiomètres I et III de réglage des débits d'allures minimale et maximale de la VMC-DF sont respectivement positionnés à la moitié et au tiers de leur course totale. La surface des logements de type T5 vaut environ 105 m², soit un volume d'environ 260 m³ avec une hauteur moyenne sous plafond de 2,5 m. Lors de l'essai de fonctionnement du système combiné dans ces deux logements, la température extérieure est de 18,5°C environ et les températures au niveau des différentes bouches sont relevées à titre indicatif.

Tableau 3.23 : Débits volumiques moyens de ventilation dans les différentes pièces du logement I

q _v [m ³ /h]	Allure réduite		Allure normale		Allure élevée	
Séjour	30	22,5°C	40	22,4°C	48	22,3°C
Chambres	15 x 4 = 60	28,0°C	19 x 4 = 76	27,0°C	25 x 4 = 100	26,0°C
Total air soufflé	90		126		148	
Cuisine	45	23,0°C	58	22,6°C	116	22,3°C
SdB + WC au RdC	15	22,5°C	22	22,2°C	30	22,1°C
SdB à l'étage	16	22,8°C	24	22,0°C	32	22,0°C
WC à l'étage	16	22,8°C	26	22,0°C	30	22,0°C
Total air extrait	92		130		208	
Renouvellement d'air	0,35 vol/h		0,50 vol/h		0,80 vol/h	

Tableau 3.24 : Débits volumiques moyens de ventilation dans les différentes pièces du logement J

q_v [m ³ /h]	Allure réduite		Allure normale		Allure élevée	
Séjour	28	23,0°C	42	23,0°C	48	22,0°C
Chambres	18 x 4 = 72	30,2°C	23 x 4 = 92	29,0°C	25 x 4 = 100	26,5°C
Total air soufflé	100		134		148	
Cuisine	45	23,0°C	75	23,0°C	140	22,5°C
SdB + WC au RdC	20	22,0°C	25	21,7°C	28	21,0°C
SdB à l'étage	22	22,0°C	23	22,0°C	30	21,0°C
WC à l'étage	22	22,0°C	25	22,0°C	27	21,0°C
Total air extrait	109		148		225	
Renouvellement d'air	0,42 vol/h		0,57 vol/h		0,86 vol/h	

De manière générale, il existe un déséquilibre assez important entre les débits de ventilation soufflés et extraits lorsque la VMC-DF fonctionne à allure élevée. En effet, des régulateurs de débit de 45 m³/h pour le séjour et de 30 m³/h pour chacune des 4 chambres limitent le débit total maximum d'air neuf soufflé dans l'habitation à environ 165 m³/h, même avec le potentiomètre III de la VMC-DF réglé au plus loin de sa course

Le choix d'un régulateur de 45 m³/h pour le séjour semble alors être contestable et il aurait été normal de lui préférer un régulateur de 75 m³/h de manière à atteindre un débit maximum de 195 m³/h d'air neuf soufflé dans le logement, comme cela était annoncé dans le Tableau 3.1. Cependant, avec un tel régulateur pour la bouche du séjour, qui se trouve au point le plus court du réseau de ventilation, il aurait été impossible d'atteindre les débits escomptés dans les chambres... En effet, on peut noter qu'ici, les 30 m³/h attendus dans les chambres ne sont même pas tout à fait atteints à allure élevée.

Les mesures de débits sur le système combiné en fonctionnement traduisent que les pertes de charge du réseau sont un peu trop élevées pour atteindre les débits d'air de ventilation escomptés au niveau des bouches de soufflage du logement. Ainsi, lors d'un essai avec les deux potentiomètres de réglage de la VMC-DF en position maximale, le débit total d'air soufflé dans le logement vaux environ 155 m³/h et les pressions mesurées au niveau des bouches de soufflage dans les chambres restent très faibles, à savoir inférieures à 20 Pa.

Au vu de ce déséquilibre entre les débits insufflés et extraits, un fonctionnement prolongé de la VMC-DF à allure élevée pourrait alors progressivement conduire à la mise en dépression de l'habitation. Si cela n'entraîne pas de risque particulier du fait de l'étanchéité du système de chauffage et de ventilation, il reste que l'équilibrage du système de ventilation devrait être amélioré de manière à proposer une installation qui soit conforme aux règles de l'art et aux exigences réglementaires.

Suite aux mesures réalisées dans le cadre du projet Vecteur Air Bois, des résultats complémentaires de la part de professionnels seraient bienvenus, mais avec l'entrée des locataires dans les logements, la question se pose de savoir qui doit intervenir pour effectuer de nouveaux réglages et relevés sur site ?

Niveau sonore de la ventilation

Le Tableau 3.25 donne les niveaux sonores moyens mesurés avant tout traitement acoustique dans le séjour et dans les chambres des logements I et J pour les différentes allures de la VMC-DF. Une mesure est effectuée au niveau de la bouche de soufflage et une autre au centre de la pièce.

Tableau 3.25 : Niveaux sonores moyens dans les pièces de vie pour différentes allures de la VMC-DF

Lw [dBA]	Allure réduite		Allure normale		Allure élevée	
Lieu de la mesure	Bouche	Centre	Bouche	Centre	Bouche	Centre
Séjour	48	40	50	45	58	51
Chambres	41	35	45	40	52	46

Le dossier de consultation des entreprises (DCE) de l'opération de construction précise que le niveau acoustique de la VMC-DF ne doit pas dépasser 30 dBA dans les pièces principales et qu'un traitement acoustique doit être apporté s'il existe un risque de transfert du bruit par les gaines.

Un silencieux a ainsi été installé en aval de la VMC-DF sur la conduite transportant la totalité de l'air neuf soufflé. Par ailleurs, face à la gêne acoustique ressentie dès les premiers jours par les locataires du logement J lors du fonctionnement de la VMC-DF à allure normale et élevée, des anneaux acoustiques ont été installés dans ce logement en amont des différentes bouches de soufflage. Ici encore, des mesures professionnelles auraient été appréciables pour compléter nos résultats.

➤ **Test d'étanchéité à l'air**

Des tests de perméabilité à l'air ont été réalisés par l'entreprise IMHEOL sur un échantillon de trois logements par bâtiment, conformément aux règles techniques Effinergie et selon la norme NF EN 13829, ainsi que le guide GA P50-784. Les résultats complets des essais ont été remis au maître d'ouvrage le 11 octobre 2010.

Pendant les essais, les entrées d'air des pièces principales sont fermées par du ruban adhésif et les bouches d'extraction d'air des pièces de service sont obturées à l'aide de vessies gonflables. Les différents ouvrants donnant sur l'extérieur et les locaux non chauffés sont fermés durant le test, tandis que les portes intérieures des pièces de service restent ouvertes, à l'exception des portes des WC et des portes des placards. Enfin, il est vérifié que l'ensemble des siphons sont bien en eau.

L'objectif du test de perméabilité à l'air est de visualiser les infiltrations d'air parasites et de quantifier les fuites d'air de l'enveloppe. Une différence de pression entre l'intérieur du local et l'extérieur est ainsi créée au moyen d'une « porte soufflante » (cf. Figure 1.16), qui remplace un des ouvrants de l'enveloppe et comporte un orifice dans lequel est placé un ventilateur assurant soit l'extraction de l'air intérieur pour un essai en dépression, soit le soufflage de l'air extérieur dans l'habitation pour un essai en surpression.

Une série de couples débit/pression est ainsi obtenue. La valeur du débit de fuite obtenue pour une différence de 4 Pa entre l'intérieur du local et l'extérieur est retenue, puis rapportée à la surface déperditive du logement. Cette valeur est notée $Q_{4Pa-surf}$ et s'exprime en $[m^3/(h.m^2)]$.

Des tests de perméabilité à l'air ont été réalisés par l'entreprise IMHEOL sur un échantillon de trois logements par bâtiment (dont les logements I, J et K qui affichent d'ailleurs les meilleurs résultats et dont une vue extérieure est donnée par la Figure 3.38), conformément aux règles techniques Effinergie et selon la norme NF EN 13829, ainsi que le guide GA P50-784 [NF_EN_13829, 2001].

Les valeurs de perméabilité à l'air mesurées pour chacun des trois logements testés dans chaque bâtiment ainsi que la valeur calculée de la perméabilité globale équivalente (valeurs en gras) pour chaque bâtiment de la résidence sont rapportées dans le Tableau 3.26.

Tableau 3.26 : Résultats des tests de perméabilité à l'air sur les logements de Fontaine le Comte

$Q_{4Pa-surf}$ [$m^3/(h.m^2)$]	Logement 1	Logement 2	Logement 3	Perméabilité globale équivalente
Bâtiment A	1,68	1,09	0,48 (I)	0,86
Bâtiment B	1,20	1,01	0,49 (J)	0,76
Bâtiment C	0,90	0,93	0,51 (K)	0,70

D'après le diagnostic qualitatif de l'enveloppe, les principales fuites répertoriées lors de ces essais sont localisées au niveau des *menuiseries* (périphérie, paumelles et poignées), au niveau des éléments de conduit de cheminée en *traversée de plafond* mais aussi au niveau de l'arrivée d'eau de l'évier de la salle de bain en *traversée de paroi*, puis au niveau des *appareils électriques* (tableau électrique, boîte de dérivation, spot très basse tension de la cuisine) et enfin, mais de façon moins marquée, au niveau du *poêle à granulés de bois*.

La Figure 3.37 permet de situer les différents résultats obtenus lors du test d'étanchéité à l'air par rapport à l'échelle d'appréciation de la perméabilité à l'air en bâtiments collectifs. On peut noter que les valeurs de perméabilité globale équivalente sont toutes situées dans la limite inférieure de la zone jugeant les résultats comme « Excellents ». Ces bâtiments affichent donc **un très bon niveau d'étanchéité à l'air** d'un point de vue réglementaire et compte tenu de leurs très bonnes performances énergétiques (cf. Annexe 10), ils ont obtenus le label *BBC-Effinergie*.



Figure 3.37 : Échelle d'appréciation de la perméabilité à l'air $Q_{4Pa-surf}$ en bâtiments collectifs



Figure 3.38 : Vues extérieures des trois logements étudiés lors du test d'étanchéité à l'air

3.3.3. Dispositifs de mesure pour le suivi des logements

Le Tableau 3.27 présente les caractéristiques techniques des principaux capteurs retenus pour instrumenter les logements étudiés lors de l'hiver 2010-2011. Les différents paramètres mesurés sont :

- la température et l'humidité relative de l'air extérieur sous abri ;
- la température et l'humidité relative de l'air dans chacune des pièces de vie et de service ;
- le taux de monoxyde de carbone dans la gaine de soufflage d'air en aval du CETP ;
- la consommation électrique suivant les allures de la VMC-DF et les régimes du PGB-CE ;
- la consommation en granulés de bois du poêle ;
- et le taux de dioxyde de carbone dans la pièce de vie principale d'un logement en particulier.

Tableau 3.27 : Principaux dispositifs de mesure utilisés dans les trois logements étudiés

Matériel	Caractéristiques	Vue
Enregistreur miniature autonome de température, d'humidité et de pression MSR 145 S chez MSR ELECTRONICS	<i>Gamme de mesure</i> T[°C] : - 10 à + 65°C HR[%] : 0 à 100% P[mbar] : 0 à 2500 mbar <i>Précision</i> T[°C] : ± 0,1°C de 5 à 45°C / ± 0,2°C sinon HR[%] : ± 2% de 10 à 90% et de 0 à 40°C P[mbar] : ± 2,5mbar de 750 à 1100 mbar <i>Capacité</i> : 2 000 000 mesures <i>Périodes de mesure</i> : 1 s à 12 h <i>Alimentation</i> : pile Lithium rechargeable USB <i>Dimensions</i> : 52 x 20 x 15 mm	
Enregistreur miniature autonome de monoxyde de carbone EL-USB-CO300 chez LASCAR ELECTRONICS	<i>Gamme de mesure</i> : 0 à 300 ppm <i>Résolution</i> : 0,5 ppm <i>Précision</i> : ± 6% <i>Capacité</i> : 32000 mesures <i>Périodes de mesure</i> : 10 s à 12 h <i>Alimentation</i> : 1 pile 3,6 V 1/2 AA Lithium <i>Température d'utilisation</i> : -10 à +40°C	
Enregistreur de consommation électrique ENERGY LOGGER 4000 chez VOLTcraft	<i>Gamme de puissance active</i> : 1,5 à 3000 W <i>Résolution</i> : 0,1 W <i>Précision</i> : ± 1% + 1 count (5 à 3500 W) <i>Tolérance</i> : ± 1 digit <i>Mesure de consommation</i> : 1 Wh à 9999 kWh <i>Durée d'enregistrement</i> : 180 jours maxi <i>Tension de fonctionnement</i> : 230V/50Hz ± 10% <i>Consommation propre</i> : 1,8 W	

➤ **Suivi de la qualité de l'ambiance intérieure**

La Figure 3.39 décrit l'implantation de la métrologie utilisée sur site réel lors de l'hiver 2010-2011 pour effectuer le suivi de la qualité de l'ambiance dans les différentes pièces des trois logements étudiés, ainsi que le suivi des consommations d'énergie de l'installation de chauffage et de ventilation.

MSR145

Dans chaque logement, nous disposons de 11 enregistreurs miniatures qui relèvent la température et l'humidité relative de l'air avec un pas de temps de 10 min. Ils sont implantés dans les différentes pièces de vie où de l'air neuf est introduit (cercle bleu) et de service où de l'air vicié est extrait (cercle vert) du logement. Parmi ces capteurs, il y en a 2 qui possèdent des rôles un peu plus spécifiques. Le premier (cercle jaune) est placé dans le cellier pour juger de l'intérêt de cette zone tampon, tandis que le second (cercle rouge) est installé au rez-de-chaussée dans le local technique contenant le conduit de cheminée pour connaître les conditions d'ambiance du conduit échangeur. Ce dernier capteur relève aussi la pression atmosphérique.

TINYTAG Ultra2

En complément des capteurs précédents, nous utilisons dans chaque logement un autre enregistreur miniature (losange orange) pour relever la température et l'humidité relative dans le local technique situé à l'étage contenant la VMC-DF. Ce point de mesure permettra d'évaluer l'amplitude de la stratification thermique entre la partie inférieure et la partie supérieure du local technique. Un autre capteur de ce type est placé sous abri (losange bleu ciel) hors des logements pour enregistrer la température et l'humidité relative de l'air extérieur.

EL-USB-CO300

Un enregistreur de monoxyde de carbone (triangle noir) est placé dans chaque logement en aval du conduit échangeur dans la gaine de soufflage de l'air de ventilation réchauffé pour vérifier que l'utilisation du système combiné n'entraîne aucun risque pour les occupants. Dans le logement de référence, ce capteur est placé près du conduit de fumée dans le local technique au rez-de-chaussée.

Analyseur Q-TRAK

On dispose également d'un appareil portatif de mesure de la qualité de l'air (cercle étoilé violet) qui est placé dans la pièce de vie principale de chaque logement pour une durée de 2 mois environ et qui enregistre le taux de CO₂ et de CO en plus de la température et de l'humidité relative.

➤ **Suivi des consommations d'énergie du PGB-CE et de la VMC-DF**

ENERGY LOGGER 4000

Deux enregistreurs de consommation d'énergie électrique (éclair jaune) équipent chaque logement au niveau du branchement du poêle à granulés et de la VMC-DF. Le relevé des compteurs habituels d'eau et d'électricité du logement sont assurés quant à eux par le bailleur social.

Enfin, les occupants sont chargés de comptabiliser le nombre de sacs de granulés utilisés chaque mois pour faire fonctionner le poêle. Pour cela, il leur est demandé de remplir une grille sur le livret de suivi de leur logement, en y inscrivant un bâtonnet pour chaque sac consommé.

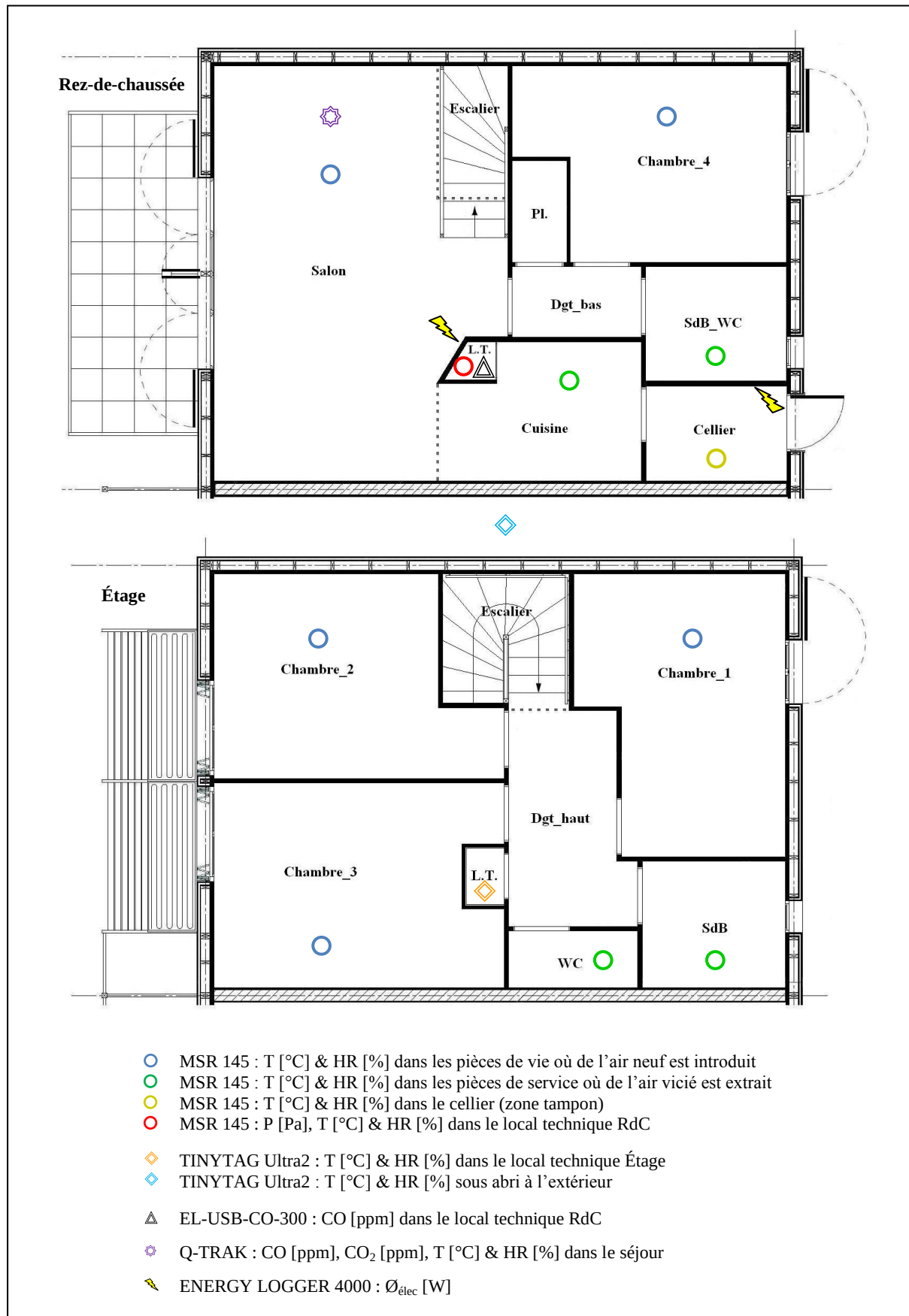


Figure 3.39 : Description de l'implantation de la métrologie pour le suivi expérimental sur site

3.3.4. Accompagnement des locataires

L'accompagnement des locataires est organisé par le bailleur SIPEA habitat. À leur entrée dans le logement, une formation est dispensée aux futurs occupants pour les familiariser au fonctionnement, à l'utilisation et à l'entretien de leur poêle à granulés et de leur VMC double flux. Les gestes permettant d'assurer le bon entretien des équipements leur sont expliqués et un livret technique simple et pédagogique leur est remis pour qu'ils s'approprient les spécificités de leur logement. Il y est notamment souligné que leur comportement peut influencer de manière importante leur consommation et donc le montant de leurs charges. En ce sens, ils sont invités à respecter au mieux les conseils contenus dans ce livret en signant une charte d'engagement. Les occupants ont aussi la possibilité de contacter un technicien référent au projet.

En plus de l'accompagnement mené par le bailleur, les occupants des trois logements étudiés sont régulièrement sollicités lorsque les mesures enregistrées par les capteurs installés dans leur habitation doivent être relevées. Ces visites sont autant d'occasions qui permettent d'établir un lien entre la théorie et la pratique, puis d'échanger directement avec les locataires à propos de leur appropriation du système de chauffage et de ventilation ainsi que de leur ressenti en termes de qualité des ambiances dans leur logement. À la fin de l'hiver 2010-2011, un retour d'expérience global est réalisé auprès des occupants des trois logements étudiés. Les principales informations concernant les locataires sont présentées dans le Tableau 3.28.

Tableau 3.28 : Données attachées aux locataires des trois logements étudiés lors du suivi sur site

Logement	I	J	K
n° sur site	29	35	43
Nb. d'occupants	1 adulte et 3 enfants	2 adultes et 2 enfants	2 adultes et 2 enfants
Fonctionnement	VMC allure 2 / parfois 1 Poêle P1-V1	VMC allure 2 Poêle P2-V2	VMC allure 2 Poêle P3-V3
Occupation	Présence constante	Présence après-midi	Présence alternée
Point fort	Chauffage	Orientation logement	Chauffage
Point faible	Finitions / Extérieurs	Finitions / Extérieurs / T°C froides à l'étage	Finitions / Extérieurs / Acoustique entre pièces
Observations	1 peu chaud en bas parfois Pas de soucis avec enfants	1 sac pour 2 j en hiver Conso. sèche-serviette	Arrêt poêle au 15 mars / Courant d'air descendant
Habitudes	Poêle soir et matin pas nuit Fenêtres ouvertes le matin	Pas de changement d'allure Souci d'économie marqué	Pas de porte vers Cellier Fenêtre ouverte nuit ch.3
Bilan	OK	Intervention architecte	Départ en mai 2011

Inventaire et natures des visites réalisées sur site

Visite n°1 : Mercredi 29 septembre 2010 – Mise en place des capteurs et explication du suivi

Visite n°2 : Mercredi 03 novembre 2010 – Collecte des données et retour d'expérience des locataires

Visite n°3 : Mercredi 15 décembre 2010 – Collecte des données et retour d'expérience des locataires

Visite n°4 : Mercredi 02 février 2011 – Collecte des données et retour d'expérience pour le logement K

Visite n°5 : Mardi 08 février 2011 – Collecte des données et retour d'expérience pour le logement J

Visite n°6 : Mercredi 13 avril 2011 – Récupération des capteurs et retour d'expérience pour tous les locataires

3.4. RÉSULTATS DES MESURES SUR SITE

La Figure 3.40 donne une vue extérieure générale des 11 logements de la résidence Guy de Maupassant à Fontaine le Comte prise fin septembre 2010 quelques jours avant le début de la période de chauffe 2010-2011.



Figure 3.40 : Vue extérieure générale de la résidence Guy de Maupassant à Fontaine le Comte

L'analyse des données recueillies sur site permet de qualifier le fonctionnement global du système combiné de chauffage et de ventilation, mais une analyse plus précise est difficile. En effet, il existe des différences trop importantes dans les usages et les comportements des locataires pour effectuer des comparaisons pertinentes entre chaque logement. Ces éléments nous invitent donc à considérer sous un nouveau jour les objectifs du suivi sur site.

3.4.1. Analyse de la qualité de l'ambiance intérieure

Compte tenu des contraintes de disponibilité des occupants du logement K et d'une mauvaise manipulation de l'appareil par les occupants du logement J, seul le suivi sur le mois d'octobre 2010 de la qualité de l'ambiance intérieure (QAI) dans la pièce principale du logement I a pu être réalisé avec le capteur Q-Trak. Le logiciel Trak-Pro permet d'établir le graphique donné par la Figure 3.41.

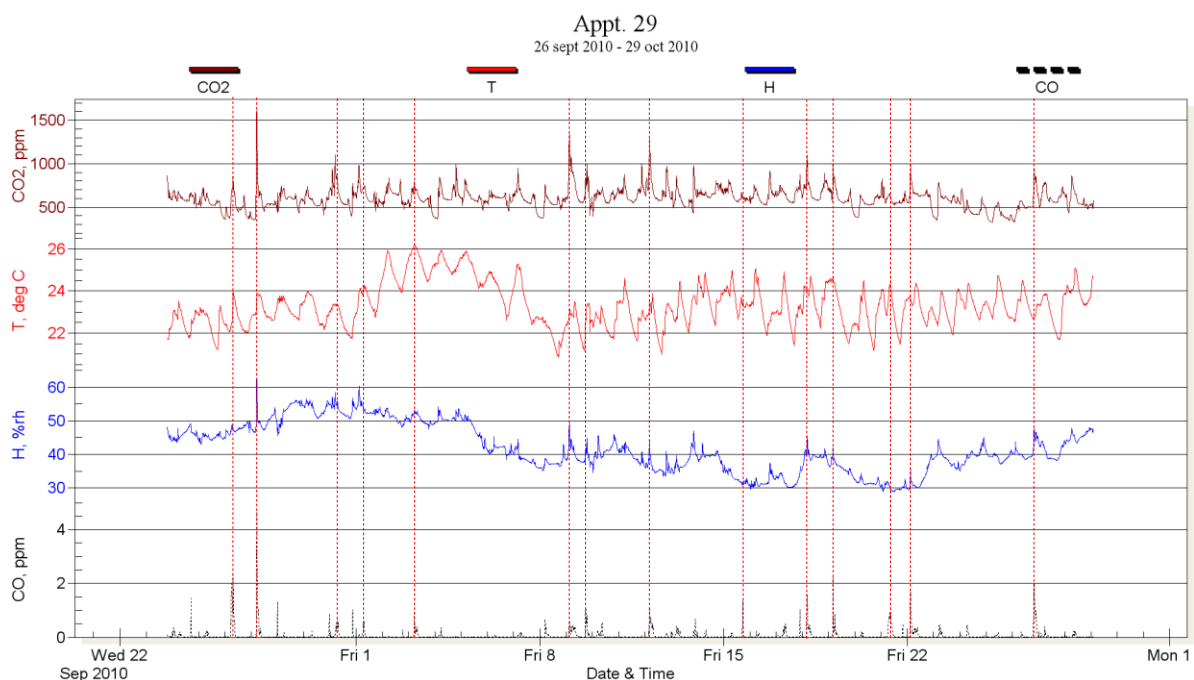


Figure 3.41 : Suivi de la qualité de l'ambiance intérieure dans le salon du logement I en d'octobre 2010

Les données représentées sur le graphique de la Figure 3.41 ont été relevées pendant le mois d'octobre 2010. Le but de ces mesures est d'obtenir un suivi de la QAI dans la pièce de vie principale du logement, avec la mesure du taux de CO₂, de la température, de l'humidité relative et du taux de CO. Le Tableau 3.29 donne les quelques résultats statistiques des paramètres mesurés.

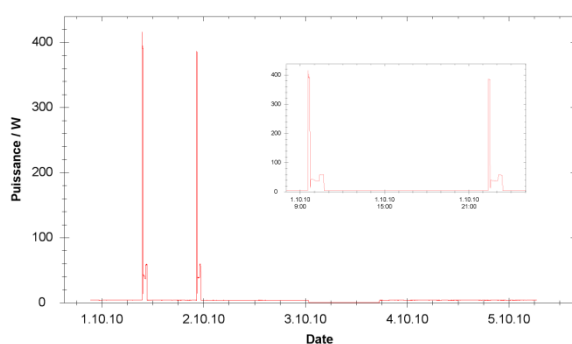
Tableau 3.29 : Résultats du suivi de la qualité de l'air intérieur dans le salon du logement I

Paramètre	CO ₂	T	HR	CO
Unité	[ppm]	[°C]	[%]	[ppm]
Moyenne	599	23,3	41,9	0,1
Minimum	324	20,9	29	0,0
Maximum	1615	26,2	62,3	4,6

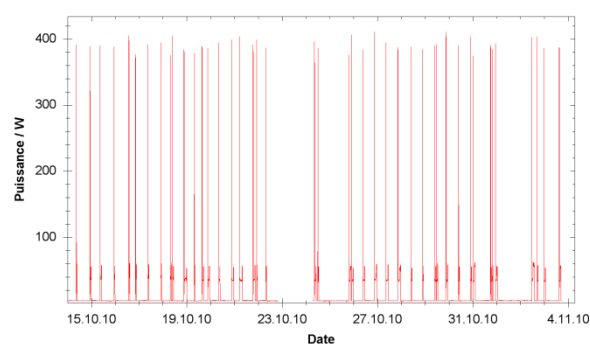
L'analyse du graphique de la Figure 3.41 et des valeurs présentées dans le Tableau 3.29 permettant de juger la QAI dans la pièce principale du logement n°29 sur la période du 26 septembre 2010 au 29 octobre 2010 est détaillée dans les paragraphes suivants :

- Mesure du taux de CO₂ [ppm]

Le niveau moyen du taux de CO₂ est d'environ 600 ppm, ce qui est tout à fait acceptable. On peut toutefois noter la présence de quelques pics pour lesquels le taux mesuré s'approche des 1000 ppm et qui traduisent des périodes de plus forte activité ou de présence des occupants. On peut aussi s'interroger sur l'existence d'une éventuelle corrélation entre ces pics de CO₂ dans la pièce principale et la mise en fonctionnement du poêle. À ce titre, les graphiques de la Figure 3.42 obtenus avec l'enregistreur de consommation électrique placé au niveau de la prise du poêle renseignent sur la puissance consommée par l'appareil et permettent d'identifier clairement ses différents cycles de fonctionnement, marqués à l'allumage par une puissance consommée d'environ 400 W.



2 allumages début octobre (vers 9h30 et 22h15) et une extinction totale de l'appareil le 03 octobre 2010



43 allumages de l'appareil sur 21 jours entre le 14 octobre et le 4 novembre 2010

Figure 3.42 : Détail de la consommation électrique du poêle à granulés du logement I au mois d'octobre

Il apparaît que les deux allumages du poêle du 1^{er} octobre 2010 n'impliquent pas une élévation significative du taux de CO₂ dans la pièce principale, mais bien celle de la température comme cela est détaillé ensuite. Ensuite, les 43 cycles de fonctionnement du poêle entre le 14 octobre et le 4 novembre n'entraînent pas la présence de pics particuliers de CO₂ visibles sur le graphique de la Figure 3.41. En synthèse, l'élévation du taux de CO₂ dans la pièce principale semble donc être davantage liée à la présence des occupants qu'au fonctionnement de l'appareil de chauffage au bois.

- Mesure de la température T [°C]

En premier lieu, il peut être souligné que la température moyenne dans la pièce principale du logement I est supérieure à 23°C sur la période étudiée. Ensuite, il apparaît que cette température reste relativement stable et s'établit entre 21 et 26°C avec des cycles de montée et descente en température d'environ 2°C. Cet écart entre le jour et la nuit est tout à fait normal et même appréciable pour profiter d'une température moins élevée pendant la période de sommeil.

Les occupants du logement I ont ainsi adopté, consciemment ou non, une température moyenne assez élevée dans la pièce principale de leur habitation, comme cela est couramment observé dans les bâtiments de type BBC. On peut également noter une semaine plus chaude pendant laquelle la température moyenne s'établit à 25°C dans le séjour, avec 26°C le jour et 24°C la nuit. Cette période fait suite aux deux premiers allumages du poêle à granulés le 1^{er} octobre 2010 comme illustré sur le graphique de gauche de la Figure 3.42 et la chaleur est ensuite bien conservée dans le logement.

- Mesure de l'humidité relative HR [%]

L'humidité relative varie entre 30% et 60% environ avec une valeur moyenne d'environ 40% sur la période considérée, ce qui traduit le respect des conditions de confort hydrique pour les occupants. Les mesures étant effectuées dans la pièce de vie principale, il est également intéressant de noter qu'il n'y a pas de pic d'humidité particulier comme c'est le cas dans les pièces humides. Cela permet de confirmer la bonne évacuation de l'air chargé d'humidité, en particulier au niveau de la cuisine qui est ouverte sur le séjour.

- Mesure du taux de CO [ppm]

Le CO étant un gaz mortel, il est très rassurant de ne mesurer que quelques traces de ce composant dans la pièce de vie principale. En ce sens, la valeur moyenne de 0,1 ppm de CO sur la période de mesure est tout à fait normale et acceptable, mais on peut noter toutefois quelques pics à 1 ppm et un pic plus important à près de 5 ppm au début de la période considérée. De fines droites verticales ont alors été tracées en pointillés rouges sur le graphique de la Figure 3.41 au niveau des pics indiquant la présence de quelques traces de CO. Des évolutions souvent similaires sont ainsi observées pour la température et le taux de CO₂, mais il convient de rappeler que ces deux paramètres sont fortement liés à la présence des occupants. Aucune conclusion définitive ne peut donc être établie ici entre le fonctionnement du poêle et la présence de pics de CO₂ ou de CO dans le salon. L'étanchéité du système de chauffage au bois peut de ce fait être considérée comme satisfaisante et la qualité de l'air à l'intérieur du logement ne semble pas être influencée de manière prédominante ou même évidente par le fonctionnement du poêle à granulés.

Synthèse

En synthèse de cette analyse sur la période considérée, il est établi que l'ambiance intérieure du logement I est saine et propice au respect des conditions de confort pour les occupants. Toutefois, la température mesurée dans le salon est légèrement supérieure à celle habituellement conseillée et la question de l'homogénéité de la température dans les différentes pièces de vie du logement peut être posée, car cette analyse se limite à la seule pièce principale de l'habitation. Enfin, une attention particulière a été portée sur l'existence ou non d'une relation entre les pics de CO et de CO₂ mesurés et le fonctionnement de l'appareil de chauffage au bois. Sur ce point, l'utilisation du poêle ne semble pas porter préjudice à la QAI qui apparaît être majoritairement influencée par l'activité des occupants.

3.4.2. Analyse des consommations énergétiques

➤ Consommation en granulés de bois

Il a été demandé aux occupants de comptabiliser le nombre de sac de granulés utilisés par mois pour assurer le chauffage de leur habitation. À ce titre, ils disposent d'une feuille dédiée, sur laquelle il leur est demandé de tracer devant le mois en cours un trait pour chaque sac de granulés consommé. Si certains locataires se sont attachés à réaliser cette tâche avec soin, d'autres l'ont complètement ignorée, comme c'est le cas pour le logement I. Certains locataires ont également changé de marque de granulés de bois et ont observé une nette diminution de leur consommation, ainsi qu'une meilleure combustion. Tous ces éléments ne nous permettent pas de pousser plus loin l'analyse des consommations en granulés de bois et modifient par conséquent les objectifs du suivi sur site. Pour information, le Tableau 3.30 présente les données recueillies sur la consommation en nombre de sacs de 15 kg de granulés de bois par mois et par logement pendant l'hiver 2010-2011.

Tableau 3.30 : Quantité de sacs de granulés de bois consommés par logement pendant l'hiver 2010-2011

Nombre de sacs de 15 kg	Log I	Log J	Log K
Octobre		0	2
Novembre		4	2,5
Décembre		11	5
Janvier		10	8
Février		5	2,5
Mars		3	1
Total	< 50	33	21

C'est une véritable déception de ne pas avoir pu recueillir de données pour le logement I. On retiendra donc principalement qu'il est préférable que les mesures sur site soient intégralement prises en charge par un opérateur extérieur et que les locataires soient uniquement sollicités pour connaître leurs habitudes de comportement et leur ressenti en termes de confort dans leur logement.

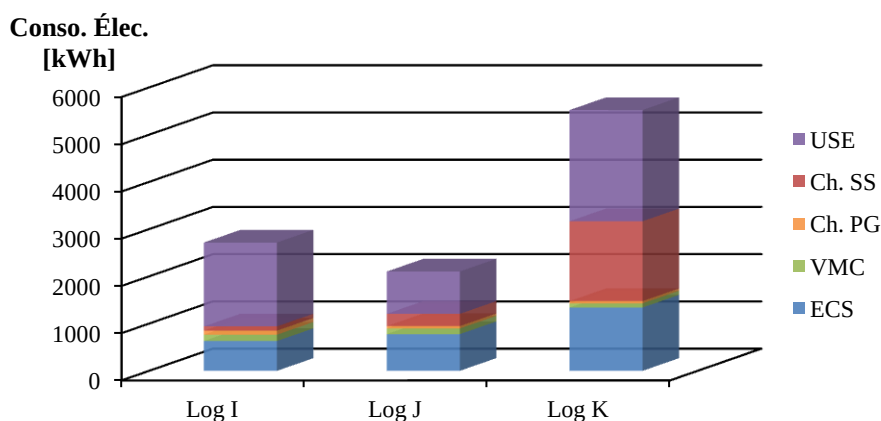
De manière très générale, une consommation moyenne de 30 sacs de 15 kg de granulés de bois peut être retenue pour couvrir les besoins de chauffage de ce type de logements pendant les 6 mois d'hiver. À raison d'un prix maximum d'environ 5€ le sac de 15 kg de granulés, cette consommation représente un coût de combustible estimé à 150€ par an.

➤ Consommation électrique par poste et totale

Le Tableau 3.31 donne les valeurs de la consommation électrique par poste et totale dans chacun des trois logements étudiés sur la période allant du 03 novembre 2010 au 13 avril 2011. Ces valeurs ont été obtenues à l'aide des compteurs et sous compteurs présents dans le tableau électrique de chaque logement et des capteurs individuels de consommation électrique ENERGY LOGGER 4000 installés au niveau du poêle à granulés et de la VMC-DF.

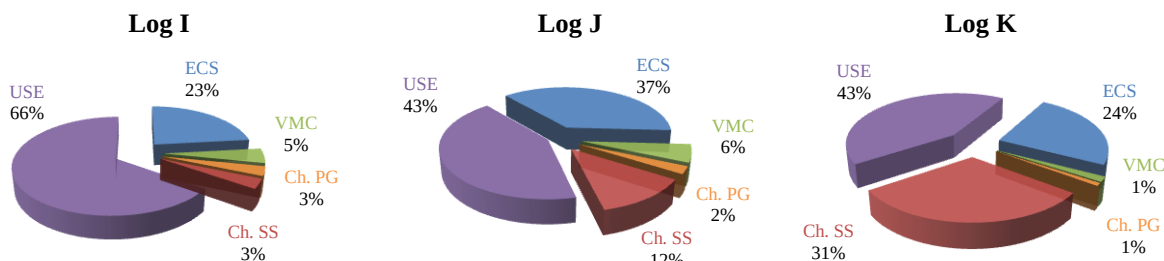
Tableau 3.31 : Consommations électriques par poste dans les trois logements étudiés

Conso. Élec. [kWh]	Log I	Log J	Log K
ECS	631,5	777,2	1341,1
VMC	134,4	119,6	87,2
Ch. PG	85,2	49,9	48,6
Ch. SS.	89,9	260,3	1690,7
USE	1775,0	895,0	2354,4
Total	2716	2102	5522

**Figure 3.43 : Consommations électriques par poste dans les trois logements étudiés**

D'après les données du Tableau 3.31 représentées graphiquement sur la Figure 3.43, on remarque que la consommation électrique totale varie du simple au double dans les logements étudiés. En effet, si les logements I et J présentent une consommation électrique semblable, celle du logement K est beaucoup plus élevée, surtout au niveau des postes relatifs à l'eau chaude sanitaire (ECS), au chauffage réalisé avec les sèche serviettes (Ch. SS) et aux usages spécifiques de l'électricité (USE).

Les trois graphiques de la Figure 3.44 précisent la proportion de chaque poste de consommation dans la facture électrique totale pour chacun des trois logements étudiés.

**Figure 3.44 : Poids de chaque poste de consommation électrique dans les trois logements étudiés**

Dans un premier temps, on observe que dans chaque logement, ce sont les usages spécifiques de l'électricité (USE) qui représentent la part principale des consommations électriques. Ces usages intègrent notamment l'éclairage et l'ensemble des consommations dues aux appareils audiovisuels et

électroménagers. À ce titre, les logements I et K, qui possèdent les plus fortes consommations sur ce poste, sont équipés d'appareils particulièrement gourmands en électricité (réfrigérateur américain, sèche-linge...). De toute évidence, il s'agit du poste qui possède le potentiel le plus élevé pour réaliser des économies d'énergie électrique.

Dans les logements I et J, le deuxième poste le plus consommateur d'électricité est celui de l'eau chaude sanitaire (ECS) et il occupe la troisième place pour le logement K. Les consommations électriques dues à ce poste sont néanmoins tout à fait acceptables compte tenu des apports gratuits obtenus grâce à l'installation solaire thermique qui équipe chaque logement.

Le deuxième poste de consommation électrique dans le logement K est celui du chauffage réalisé avec les sèche serviettes (Ch. SS). En effet, si les occupants des logements I et J ont choisi de limiter le plus possible l'utilisation de ce type d'équipement réputé pour sa forte consommation électrique et installé dans les salles de bain en bas et à l'étage, les locataires du logement K en font une utilisation soutenue. Ici encore, la bonne gestion de ce poste apparaît être un moyen important de limiter la consommation électrique du logement.

En ce qui concerne la consommation électrique de la VMC, il était attendu qu'elle se situe entre 5 et 10% de la consommation totale, ce qui est vérifié dans le cas des logements I et J. Pour le logement K, la faible quantité d'électricité consommée par la VMC est rendue encore plus anecdotique par l'importance des autres postes de consommation. Toutefois, elle peut également traduire une insuffisance du renouvellement d'air dans le logement. En effet, les débits soufflés et extraits dans ce logement n'ont pas été contrôlés.

Dans le logement I, la consommation électrique du chauffage réalisé avec le poêle à granulés (Ch. PG) est près de deux fois supérieure à celle utilisée dans les logements J et K sur ce même poste de consommation. Le poêle à granulés est en effet utilisé en continu au régime minimum P1-V1 sur de longues périodes de fonctionnement dans le logement I.

On peut souligner que la consommation électrique du poêle à granulés est dans tous les cas très faible. Cette observation renforce l'idée que ce type d'appareil de chauffage au bois possède un impact assez limité en termes de consommation d'électricité, en comparaison de sa grande souplesse d'utilisation avec des possibilités de démarrage, de régulation et d'extinction automatiques, ainsi que de ses bonnes performances liées à la qualité du contrôle de la combustion.

➤ **Détail des consommations électriques du poêle à granulés ELENA MINI**

Le Tableau 3.32 donne la puissance électrique moyenne consommée par le poêle à granulés ELENA MINI qui équipe chaque logement en fonction de son état de fonctionnement.

Tableau 3.32 : Puissance électrique moyenne consommée par le poêle à granulés ELENA MINI sur site

État de fonctionnement du poêle à granulés de bois	Puissance électrique moyenne consommée [W]
Allumage	< 400
Travail	≈ 40 à 50
Extinction	≈ 60
Veille	< 5

La Figure 3.45 donne l'allure caractéristique de la puissance électrique consommée par le poêle à granulés ELENA MINI lors d'un cycle de fonctionnement. De manière générale, l'appareil fonctionne sous un régime réduit ou modéré dans les trois logements étudiés, d'où la valeur comprise entre 40 W et 60 W pour la puissance électrique lors de la phase de travail du poêle.

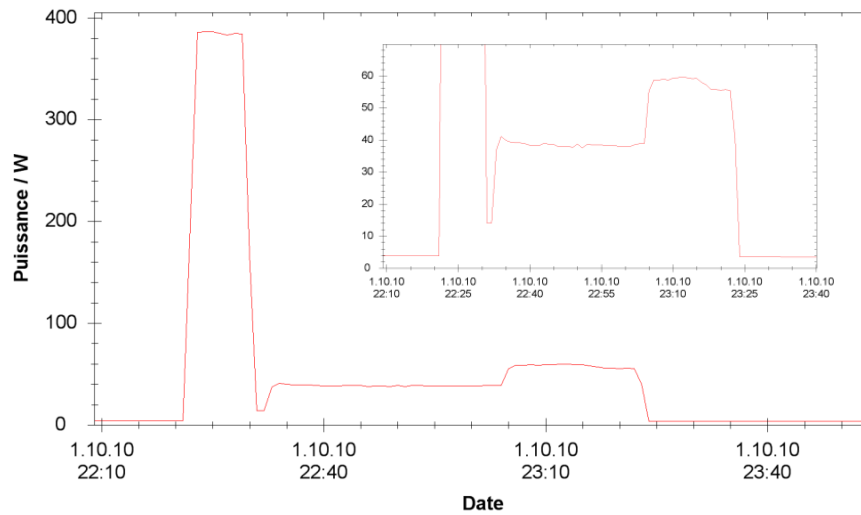


Figure 3.45 : Allure caractéristique de la puissance électrique consommée par le poêle à granulés

Consommation électrique moyenne en veille

La Figure 3.46 donne le suivi de la puissance électrique consommée par le poêle à granulés ELENA MINI sur une période d'une semaine entre le 7 octobre et le 14 octobre 2010 pendant laquelle l'appareil est resté en veille. La consommation totale pendant cette période s'élève à 0,672 kWh.

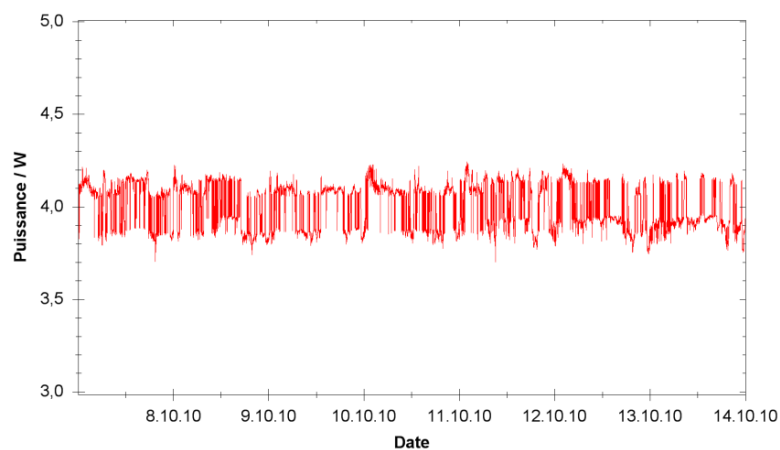


Figure 3.46 : Suivi de la puissance électrique consommée en veille par le poêle à granulés ELENA MINI

À raison d'un coût moyen de l'électricité d'environ 0,1125 €/kWh, ce poêle à granulés totaliserait une consommation d'environ 35 kWh s'il restait en veille pendant toute l'année, ce qui représente un coût annuel d'environ 4 €. Maintenir le poêle en veille pendant les 6 mois de la période de chauffe représente donc un coût de consommation électrique d'environ 2 €, ce qui paraît tout à fait acceptable pour profiter pleinement des possibilités de contrôle et de régulation de l'appareil.

Lorsque le poêle à granulés est remis en fonctionnement après une mise hors tension manuelle de l'appareil, on observe des pics de puissance consommée d'environ 900 W, soit plus du double de la valeur habituellement consommée par le poêle au démarrage. De manière plus précise, il apparaît que ces appels de puissance ont lieu à chaque redémarrage du poêle, lorsque celui-ci est mis hors tension alors qu'il n'a pas terminé sa phase de nettoyage en fin de cycle de combustion.

Ainsi, dans le cas décrit par le graphique de la Figure 3.47, le cycle de combustion engagé vers 9h30 a été interrompu brutalement vers 13h30 par la mise hors tension du poêle avant que le cycle de nettoyage ne soit effectué. La remise en fonctionnement du poêle vers 18h40 a ensuite provoqué un pic de surconsommation. Enfin, on observe qu'un cycle de combustion normal a eu lieu.

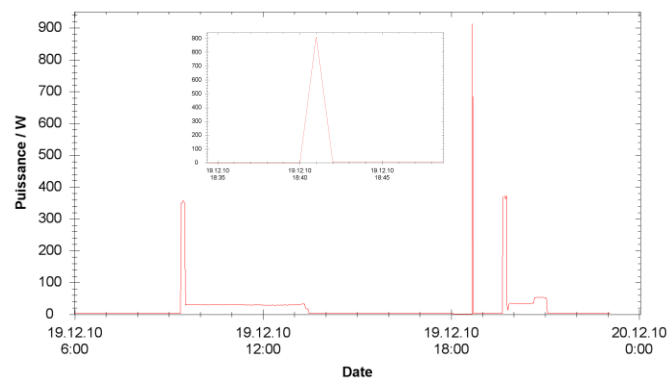


Figure 3.47 : Vue d'un pic de puissance électrique consommée par le poêle suite à un défaut d'extinction

Suite à cette analyse, il est intéressant de sensibiliser les occupants à ce phénomène pour qu'ils corrigent leurs habitudes et laissent le cycle de combustion se terminer normalement. En outre, il ne semble pas forcément pertinent de mettre l'appareil hors tension lors de la saison de chauffe durant laquelle les cycles de combustion sont fréquents.

Consommation électrique moyenne hebdomadaire en fonctionnement

Le graphique de la Figure 3.48 donne l'évolution de la puissance électrique consommée par le poêle à granulés ELENA MINI entre le lundi 24 janvier 2011 et le lundi 07 février 2011. On observe ainsi 28 cycles de fonctionnement de l'appareil, soit deux cycles de combustion par jour, pour une consommation totale d'électricité pendant ces deux semaines d'hiver qui s'établit à 5,33 kWh.

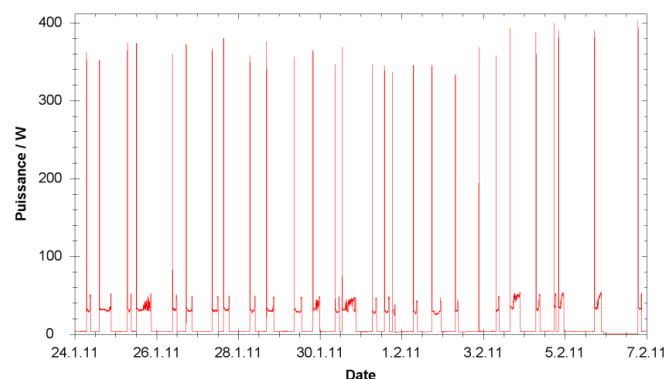


Figure 3.48 : Suivi de la puissance électrique consommée par le poêle à granulés en fonctionnement

Pour ce cas particulier qui est assez représentatif des conditions d'utilisation de ce type de chauffage, la consommation électrique moyenne hebdomadaire du poêle à granulés se situe autour de 2,65 kWh, soit un coût moyen de fonctionnement d'environ 0,30 €/semaine. En tenant compte d'un fonctionnement du poêle à granulés qui suivrait ce type d'utilisation avec deux cycles de combustion par jour pendant 26 semaines, soit plus de six mois de chauffe, le coût de l'énergie électrique consommée par le poêle resterait inférieur à 8 € environ. Ainsi, en majorant l'analyse économique, il est possible de conclure qu'à l'heure actuelle, le coût de fonctionnement annuel en électricité du poêle à granulés est inférieur à une dizaine d'euros.

➤ Détail des consommations électriques de la VMC-DF AKOR HR

Le Tableau 3.33 donne les valeurs relevées sur site de la puissance électrique moyenne consommée par la VMC-DF AKOR HR en fonction de son allure de fonctionnement dans les différents logements étudiés.

Tableau 3.33 : Puissance électrique moyenne consommée par la VMC-DF AKOR HR sur site

Allure de fonctionnement de la VMC-DF	Puissance électrique moyenne consommée [W]	
	Logements I et J	Logement K
Élevée	≈ 110	≈ 75
Normale	≈ 35	≈ 20
Réduite	≈ 20	≈ 10

Selon que le réseau de ventilation intègre un CETP (logements I et J) ou non (logement K), on peut noter qu'il existe une différence assez significative de la puissance consommée par la VMC-DF. Toutefois, si les débits d'air de ventilation insufflés et extraits ont été mesurés et contrôlés par nos soins dans les logements I et J, il est important de préciser qu'aucune mesure n'a été réalisée pour vérifier les débits de ventilation dans le logement K, qui devait pourtant servir de référence. En effet, le logement K n'était pas encore terminé lorsque nous avons réalisé l'installation du système combiné et contrôlé les débits de ventilation dans les logements I et J. Ensuite, il n'a pas été possible de savoir comment avait été contrôlée l'installation de ventilation des autres logements, si toutefois un contrôle a vraiment été effectué. Face à ce manque d'information, une courte étude économique des consommations électriques de la VMC-DF est proposée en se basant sur nos relevés.

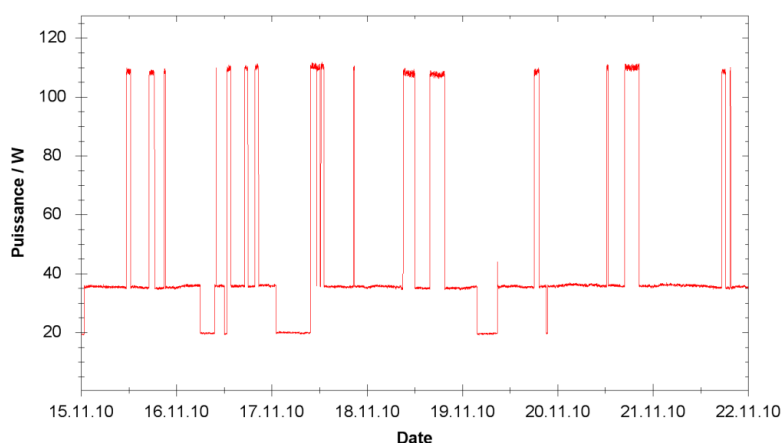


Figure 3.49 : Suivi représentatif de la puissance électrique consommée par la VMC-DF du logement I

Le graphique de la Figure 3.49 donne la puissance électrique consommée par la VMC-DF dans le logement I sur la semaine du 15/11/2010 au 22/11/2010, avec une consommation qui s'établit à 7,30 kWh. En supposant que cette semaine est représentative du fonctionnement de la VMC-DF, la consommation totale attendue sur une année vaut environ 380 kWh, ce qui représente un coût annuel d'environ 43 € pour assurer la ventilation du logement.

Pour le logement K, le suivi de la puissance consommée par la VMC-DF pendant deux semaines entre le 16/01/2010 et le 30/01/2011, illustrée par le graphique de la Figure 3.50, donne une consommation de 6,875 kWh. Compte tenu des faibles périodes de fonctionnement à allure élevée de la VMC-DF dans ce logement, on choisit de majorer un peu la consommation électrique qui s'élève alors autour de 180 kWh par an, soit un budget d'environ 20 € pour en assurer le fonctionnement.

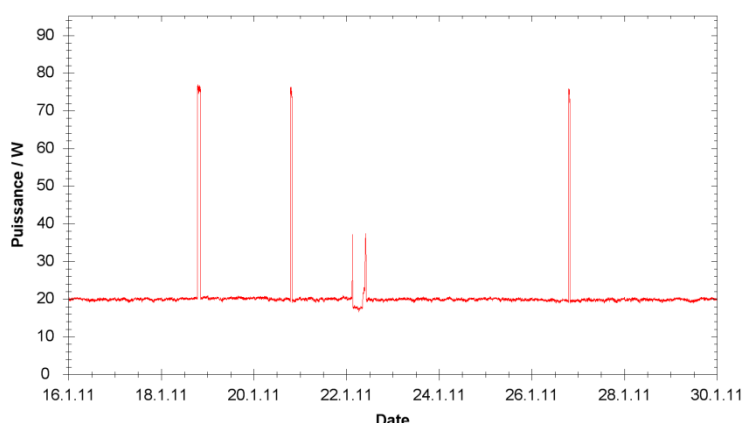


Figure 3.50 : Suivi représentatif de la puissance électrique consommée par la VMC-DF du logement K

Enfin, il peut être souligné que les consommations électriques liées au fonctionnement de la VMC-DF dépendent de l'utilisation qui en est faite par les occupants, comme cela est visible sur les graphiques des Figures 3.49 et 3.50 où l'on observe que le recours au fonctionnement de la VMC-DF à allure élevée est fortement variable.

En conclusion de l'analyse des consommations électriques des logements, on retiendra :

- ⇒ Un coût d'environ 2 € pour le maintien du poêle à granulés en veille pendant 6 mois ;
- ⇒ Un coût d'environ 8 € pour deux cycles de combustion par jour pendant 6 mois ;
- ⇒ L'importance de respecter le cycle de nettoyage final du poêle à granulés ;
- ⇒ Un coût moyen annuel inférieur à 45 € pour la VMC-DF en fonctionnement à allure normale ;
- ⇒ Des consommations électriques assujetties au comportement des locataires sur certains postes ;
- ⇒ Des possibilités d'économie d'électricité identifiées sur certains postes de consommation ;
- ⇒ Des ordres de grandeur semblables d'un logement à l'autre sur certains postes.

Enfin, on peut préciser que les locataires sont tous favorables à l'idée de disposer de sous-compteurs visibles et accessibles pour connaître le poids des différents postes de consommation électrique dans leur logement et être à même de cibler leurs efforts de réduction de consommation d'énergie.

3.4.3. Analyse de l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air

➤ Relevé des données extérieures

Le graphique de la Figure 3.51 présente l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air extérieur. Ces mesures ont été réalisées sous abri. Pendant l'hiver 2010-2011, les conditions extérieures ont connu des variations relativement douces avec toutefois plusieurs jours pendant lesquels la valeur de la température est descendue sous zéro degré. De manière générale, on peut identifier une phase allant du 15 novembre 2010 au 15 mars 2011 pendant laquelle la température est restée le plus souvent inférieure à 10°C et l'humidité relative comprise entre 80% et 100%.

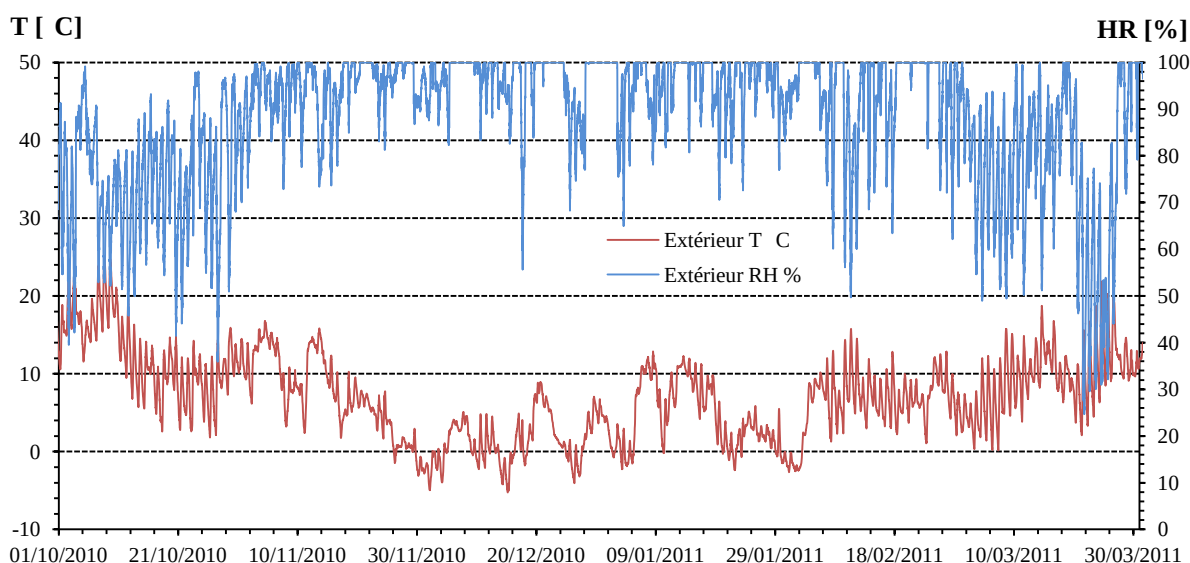


Figure 3.51 : Température et humidité relative de l'air extérieur sous abri

Comme attendu, on observe sur le graphique de la Figure 3.52 la parfaite adéquation des mesures de pression atmosphérique réalisées dans les 3 logements étudiés. Cela nous conforte quand à la qualité de nos mesures et à la possibilité de les comparer d'un logement à l'autre.

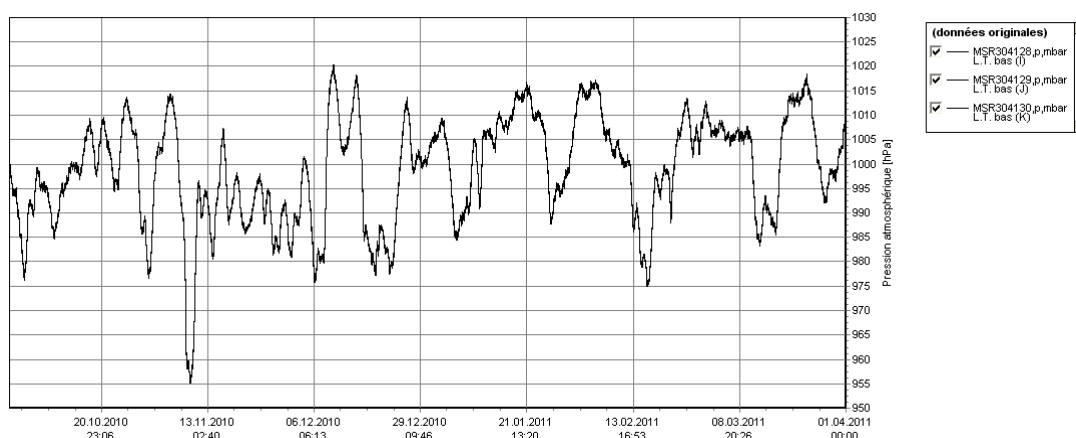


Figure 3.52 : Superposition des valeurs de la pression atmosphérique mesurées dans les trois logements

➤ Relevé des données intérieures

Analyse générale

Le graphique de la Figure 3.53 donne l'ensemble des températures et des humidités relatives relevées dans les différentes pièces de vie des trois logements étudiés. Les mesures relevées dans les pièces de service ne sont pas présentées car elles présentent des pics d'humidité qui nuisent à la lecture du graphique. En revanche, ces pics d'humidité ne traduisent pas de soucis particuliers car l'extraction de l'air vicié réalisée dans chacune de ces pièces permet de réduire rapidement le taux d'humidité après chaque utilisation pour retrouver un niveau acceptable situé entre 30% et 70%.

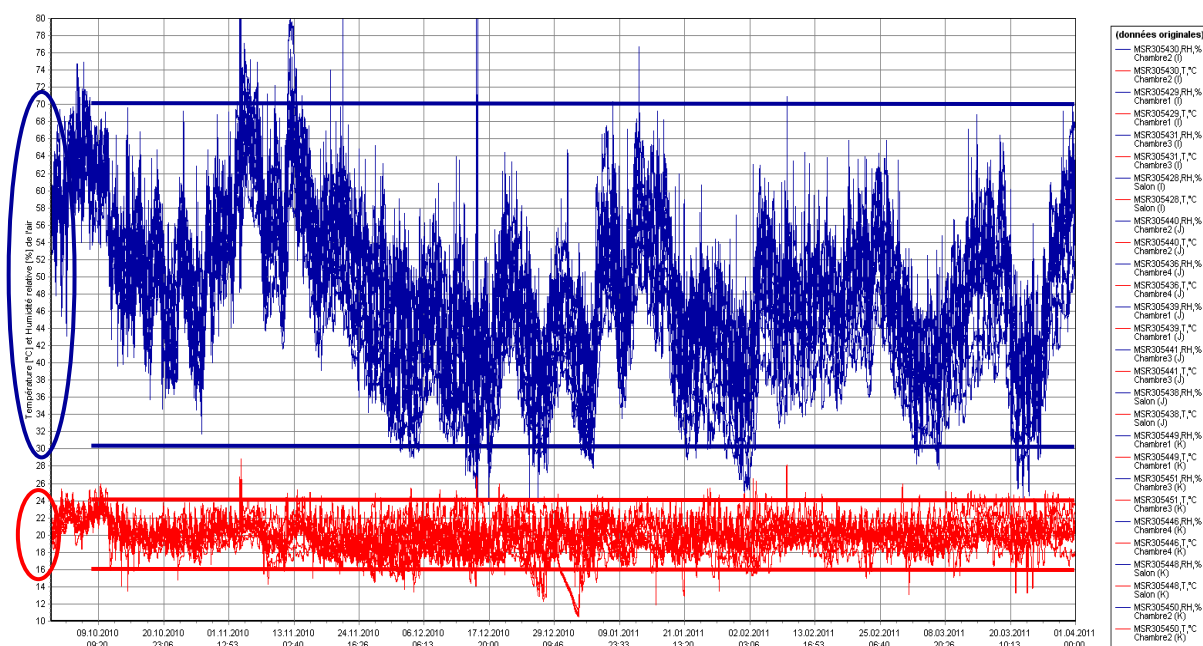


Figure 3.53 : Superposition des données mesurées dans le salon et les chambres de chaque logement

De manière générale, on observe sur le graphique de la Figure 3.53 que l'évolution de l'humidité relative est assez semblable dans les pièces de vie des trois logements étudiés et qu'elle reste comprise entre 30% et 70% sur toute la période d'hiver. Ces valeurs sont tout à fait acceptables car elles correspondent aux préconisations permettant d'assurer le confort hydryque des occupants.

Ensuite, les températures relevées dans le salon et les chambres de chaque logement se situent en moyenne entre 16 et 24°C pendant la période étudiée, ce qui implique tout de même des situations bien différentes d'un point de vue du confort ressenti par les occupants. À ce titre, une analyse plus avancée des mesures relevées dans les différentes pièces de vie de chaque logement est proposée dans les paragraphes suivants. Il faut noter toutefois que la limite basse des températures se rapproche souvent de 18°C sur de longues périodes, ce qui paraît plus acceptable.

Enfin, deux chutes notables des températures sont enregistrées autour du 29/12/10 avec des valeurs qui descendent respectivement à 13°C et à 10°C, la première fois dans le logement I et la seconde fois dans le logement J. Dans les deux cas, il s'agit d'une décroissance importante de la température dans l'ensemble des pièces de l'habitation qui est due à l'absence des occupants et au non fonctionnement du poêle à granulés pendant plusieurs jours consécutifs.

Analyse des données relevées dans salon des trois logements

Le graphique de la Figure 3.54 présente la superposition des courbes donnant l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air dans le salon de chaque logement étudié. Si l'évolution de l'humidité relative est similaire dans chaque salon, il apparaît que les valeurs mesurées dans le logement I sont souvent inférieures de 5 à 10 points par rapport à celles relevées dans les logements J et K. Comme les trois habitations sont équipées du même modèle de poêle à granulés dans le salon, cet écart peut être principalement expliqué par une moindre production d'humidité dans le logement I. En effet, les occupants de ce logement n'utilisent presque pas la pièce d'eau située au rez de chaussée à proximité de la chambre 4 et du salon (cf. plan de la Figure 3.39).

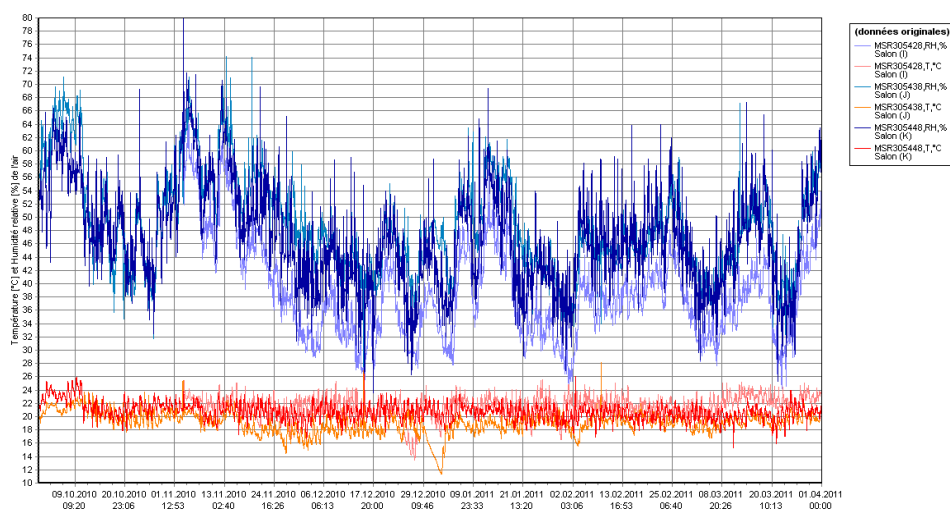


Figure 3.54 : Superposition de la température et de l'humidité relative dans le salon des trois logements

Le graphique de la Figure 3.55 permet de mieux visualiser l'évolution des températures relevées dans les salons des trois logements. On y observe que sur la quasi-totalité de l'hiver, la température dans le salon du logement I est restée supérieure de quelques degrés à celle du salon du logement K, elle-même supérieure à celle du salon du logement J. Les chutes de température ayant lieu autour du 29/12/2010 dans les logements I et J sont également bien identifiées.

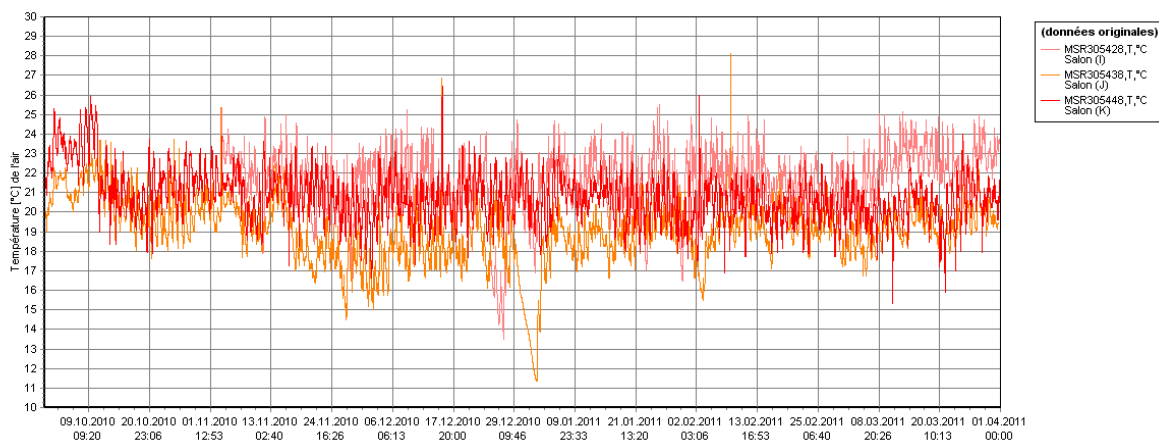


Figure 3.55 : Superposition de la température de l'air dans le salon des trois logements

Analyse des écarts relevés entre le salon et les chambres des trois logements

De manière générale, le pourcentage d'humidité relative relevé dans le salon de chaque logement est inférieur de 5 points environ à celui mesuré dans les chambres. Ce résultat était assez prévisible compte tenu de la présence dans le salon du poêle à granulés qui émet un air chaud et sec dans l'habitation. Les valeurs obtenues dans le salon et dans les chambres restent néanmoins très proches les unes des autres et demeurent tout à fait acceptables en terme de confort pour les occupants.

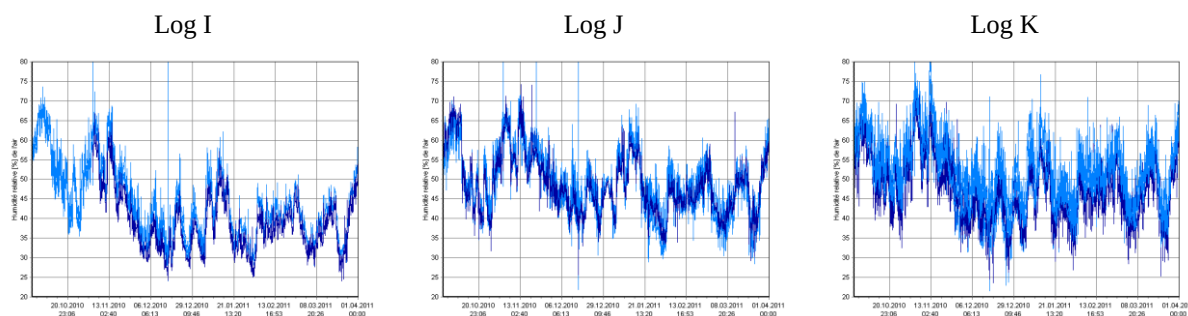


Figure 3.56 : Écart d'humidité relative entre le salon (bleu foncé) et les chambres dans chaque logement

L'humidité relative relevée dans les chambres du logement K est plus fortement marquée que dans les autres habitations du fait de l'utilisation intensive des pièces d'eau dans ce logement, comme le montrent d'ailleurs les valeurs de consommation électrique en ECS (cf. Tableau 3.31).

Analyse des écarts de température entre le salon et les chambres des trois logements

Le Tableau 3.34 présente les principaux résultats des mesures de température relevées dans les différentes pièces principales des trois logements étudiés. On peut noter l'absence de données pour la chambre 4 du logement I à cause du dysfonctionnement du capteur qui y était implanté.

Tableau 3.34 : Résultats des mesures de température dans le salon et les chambres de chaque logement

	T [°C]	Chambre 1	Chambre 2	Chambre 3	Chambre 4	Salon
Log I	Minimum	12,3	12,9	13,4	-	13,5
	Maximum	28,9	28,6	27,1	-	25,6
	Moyenne	19,1	20,2	20,4	-	21,6
	Écart type	1,68	1,49	1,27	-	1,58
Log J	Minimum	10,5	10,7	11,1	10,9	11,4
	Maximum	27,4	25,3	26,5	32,3	28,1
	Moyenne	18,8	19,3	19,3	19,1	19,0
	Écart type	2,14	1,77	1,73	1,92	1,57
Log K	Minimum	13,4	14,6	13,3	12,9	15,3
	Maximum	32,4	26,6	34,3	26,7	26,4
	Moyenne	20,0	19,2	18,2	20,5	20,8
	Écart type	1,44	1,36	1,24	1,70	1,28

Les graphiques de la Figure 3.57 permettent de visualiser et de comparer l'écart de température qui existe entre le séjour et les différentes chambres de chaque logement. L'évolution de la température du séjour est donnée par les graphiques situés sur le côté gauche. Sur les graphiques de droite, les courbes en rose représentent les températures des chambres 1, 2 et 3 situées à l'étage, tandis que la courbe en orange représente la température de la chambre 4 située au rez-de-chaussée, comme indiqué sur le plan donné par la Figure 3.39.

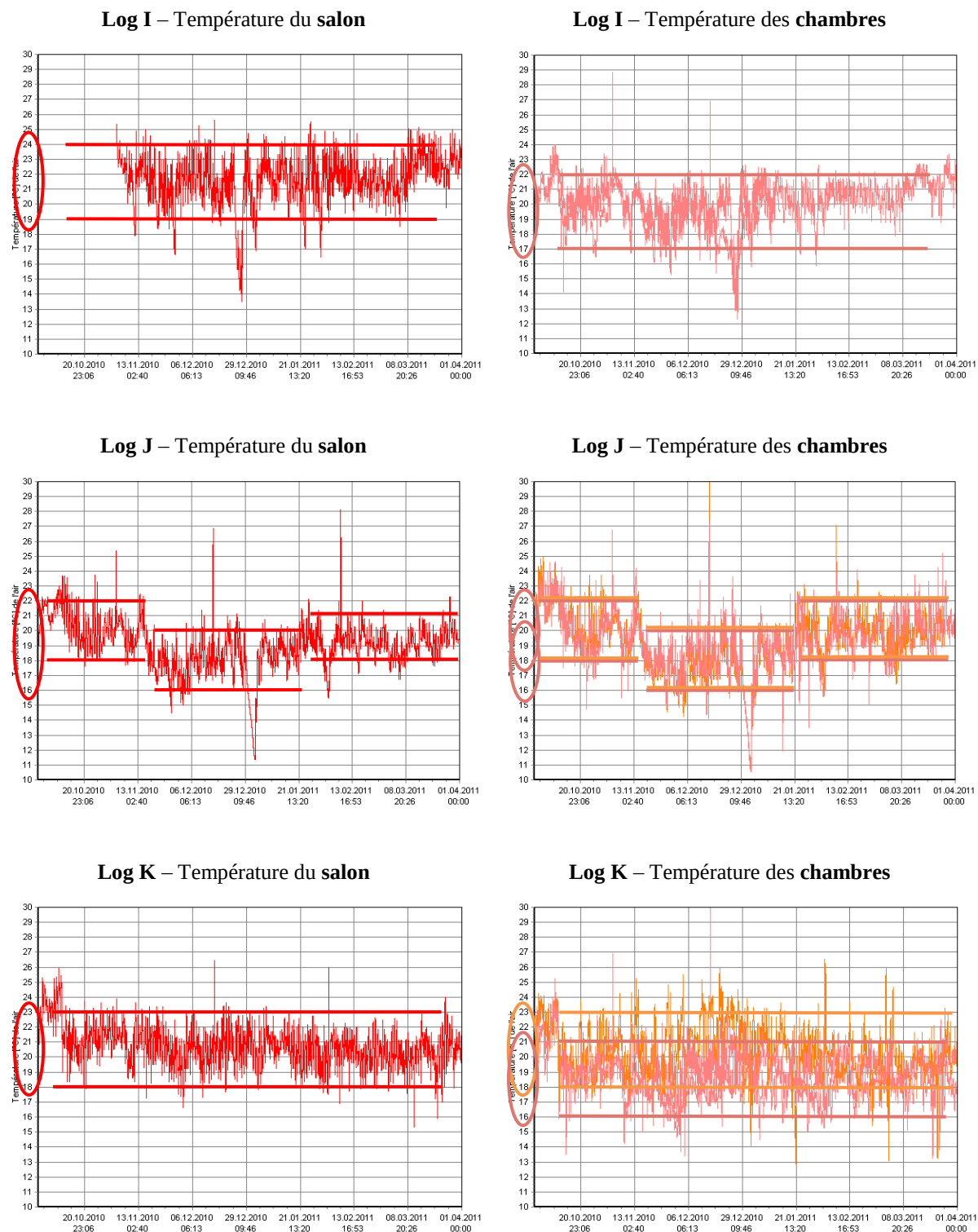


Figure 3.57 : Comparaison des températures dans les pièces principales des trois logements

Dans le **logement I**, La principale observation tient au fait que les chambres à l'étage sont en moyenne plus froides (17°C à 22°C) d'environ 2°C par rapport au salon (19°C à 24°C). Le confort thermique et la répartition de la chaleur ont néanmoins été jugés satisfaisants par les occupants du logement. Les quelques chutes de température en dessous de 19°C dans le salon et de 17°C dans les chambres sont à chaque fois liées à une période d'absence des occupants et au non fonctionnement de leur poêle à granulés. L'inertie du logement est donc assez limitée et il conviendrait de programmer l'appareil de chauffage au bois pour éviter une baisse en température généralisée de l'habitation en cas d'absence prolongée des occupants.

Dans le **logement K**, le système de chauffage a fonctionné tous les jours pendant l'hiver et la température a été maintenue autour de 20°C dans l'ensemble des pièces du logement. De façon plus détaillée, la température dans la chambre au rez-de-chaussée est toujours assez proche de celle du salon et se situe en moyenne entre 19°C et 22°C, même si elle atteint parfois les extrêmes haut et bas de 23°C et de 18°C. Il est également intéressant d'observer que la température des chambres à l'étage est ici aussi en moyenne inférieure d'environ 2°C par rapport à celle du salon et de la chambre du bas. Le confort thermique et la répartition de la chaleur ont été jugés satisfaisants par les occupants qui ont l'habitude de dormir avec les fenêtres ouvertes, ce qui explique les baisses de température jusqu'à 15°C dans la chambre 3 à l'étage. Il faut toutefois préciser qu'un convecteur électrique supplémentaire a été ajouté dans la chambre 4 située au rez-de-chaussée, côté nord. Enfin, les occupants précisent ressentir un courant d'air froid assez gênant descendant par l'escalier depuis l'étage vers le salon. Comme cela a été souligné précédemment, il conviendrait de contrôler l'équilibrage et les conditions de circulation des débits d'air dans ce logement.

Dans le **logement J**, trois phases différentes peuvent être identifiées pour décrire l'évolution des températures. On remarque également qu'il n'y a presque pas d'écart entre la température du salon et celles des chambres. Ainsi, du 1^{er} octobre 2010 au 15 novembre 2010, la température dans le salon et les chambres se situe entre 18°C et 22°C. Puis, de la mi-novembre 2010 à la fin janvier 2011, elle diminue de façon assez remarquable pour s'établir alors seulement entre 16°C et 20°C. Enfin, de début février 2011 à début avril 2011, la température augmente à nouveau dans toutes les pièces jusqu'à des valeurs comprises entre 18°C et 21°C pour le salon et jusqu'à 22°C pour les chambres. De façon compréhensible, le confort thermique et la répartition de la chaleur ont été jugés insatisfaisants par les occupants, tout particulièrement pendant la deuxième phase durant laquelle il n'a pas été possible d'atteindre un niveau de température confortable dans l'habitation, surtout dans les chambres à l'étage où les enfants se sont plaints d'avoir froid la nuit.

Comme souligné précédemment, on observe une décroissance brutale de la température dans toutes les pièces du logement J sur la période allant du 29 décembre 2010 au 02 janvier 2011. Durant cette période, les occupants sont absents et le poêle ne fonctionne pas. La température du logement descend alors à 11°C. La remise en chauffe du logement s'effectue ensuite progressivement puisqu'il faut près d'un jour et demi pour atteindre à nouveau une température de 19°C dans les différentes pièces, comme le montre le graphique de la Figure 3.58 qui donne l'évolution de la température et de l'humidité relative dans les pièces principales du logement J entre le 29/12/2010 et le 04/01/2011.

La courbe donnant la puissance consommée par le poêle à granulés sur cette même période est également présente sur le graphique de la Figure 3.58. L'appareil de combustion est ainsi resté en veille entre le 30/12/2010 et le 02/01/2011, ce qui correspond bien à la période froide pendant laquelle les occupants se sont absentés sans programmer de chauffage. On observe également que deux allumages successifs sont nécessaires à la remise en chauffe du logement lors du retour des occupants.

Ainsi, pour une période sans chauffage d'une durée de 4 jours en plein hiver, une perte de 7°C est enregistrée dans l'ensemble du logement J, malgré la récupération de chaleur au niveau de la VMC double flux à haut rendement.

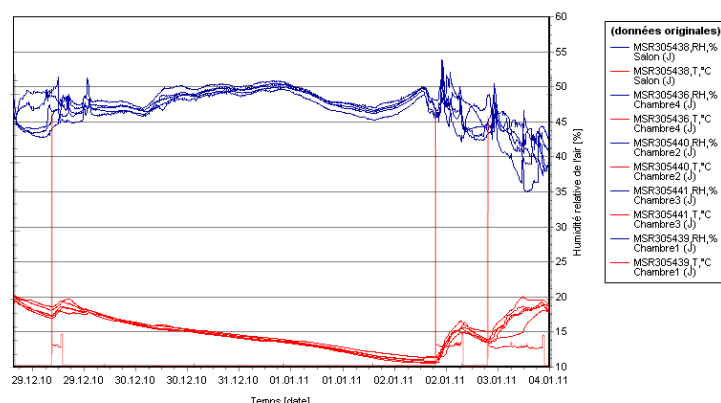


Figure 3.58 : Détails des mesures relevées dans le logement J pendant la période d'inoccupation

En synthèse et à l'exception des deux baisses de température enregistrées dans les logements I et J suite à l'absence de chauffage sur une période d'inoccupation prolongée, les conditions de confort et de répartition de la température sont donc jugées satisfaisantes dans les logements I et K, mais pas dans le logement J. Ainsi, alors que le système combiné de chauffage et de ventilation installé dans le logement I s'avère être bien adapté pour couvrir les besoins de chauffage et de renouvellement d'air, tout en offrant une bonne répartition de l'air chaud dans les chambres grâce au couplage du CETP et de la VMC-DF, ce même système combiné ne permet pas de satisfaire les besoins du logement J ni d'assurer le confort de ses occupants. En effet, les faibles valeurs de température relevées dans les différentes pièces du logement J pendant l'hiver traduisent les difficultés rencontrées par les locataires pour chauffer convenablement leur habitation. Pour mieux comprendre pourquoi le système de chauffage apporte satisfaction dans le logement I mais pas dans le logement J, il convient de souligner la présence de plusieurs marques d'humidité importantes au niveau des façades extérieures Nord et Est du logement J, qui sont le signe de défauts majeurs au niveau de son enveloppe, comme indiqué sur les vues données par la Figure 3.59.



Figure 3.59 : Vues des façades extérieures du logement J et identification des marques d'humidité

Ainsi, il s'avère que les difficultés rencontrées par les occupants du logement J pour chauffer convenablement leur habitation ne sont pas liées au système de chauffage, mais bien à des pertes thermiques au niveau de l'enveloppe du bâtiment qui sont plus importantes que dans les autres logements. À ce titre, l'intervention de l'architecte est prévue.

La bonne qualité de l'enveloppe du bâtiment est donc primordiale pour garantir les performances d'un tel système de chauffage au bois de petite puissance basé uniquement sur la distribution d'air chaud.

Analyse de la température de l'air dans le local technique derrière le poêle dans les trois logements

On observe sur les différents graphiques présentés par la Figure 3.60 que la température mesurée dans le local technique (LT) situé derrière le poêle à granulés connaît de fortes variations selon que l'appareil de chauffage fonctionne ou non. Par ailleurs, il existe des différences assez marquées entre les logements. Ainsi, pour le logement I, la température dans le local technique est le plus souvent comprise entre 18°C et 28°C. Pour le logement J, elle s'établit le plus souvent entre 16°C et 26°C. Pour le logement K, elle se situe entre 16°C et 36°C.

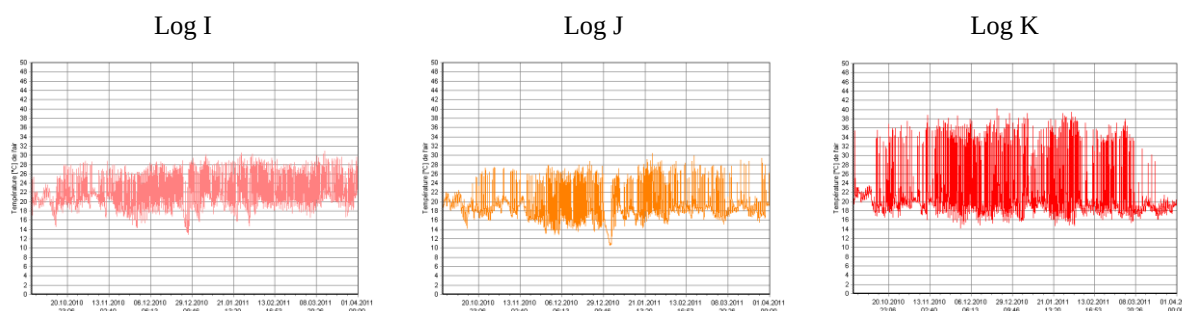


Figure 3.60 : Évolution de la température de l'air dans le local technique en bas de chaque logement

Le niveau moins élevé des températures mesurées dans le local technique des logements I et J tient principalement au fait que le conduit échangeur à triple paroi qui équipe ces deux logements dissipe moins de chaleur du côté de l'air ambiant que le conduit concentrique de cheminée qui équipe le logement K.

En effet, comme le conduit échangeur occupe presque intégralement la hauteur du local technique, l'air de combustion contenu dans l'anneau extérieur du conduit conserve une température raisonnable, car non seulement il n'est pas en contact direct avec le tube contenant les fumées, mais il cède également une partie de sa chaleur à l'air de ventilation. La température de l'air contenu dans le local technique ne s'élève donc pas autant que dans le cas où l'air de combustion se réchauffe en descendant tout le long du conduit de cheminée au contact du tube intérieur contenant les fumées, comme c'est le cas pour le logement K.

L'intégration d'un CETP dans la colonne de cheminée d'un poêle à granulés permet donc de réduire l'élévation en température du local technique qui reçoit les différents éléments de conduit, ce qui évite ainsi la présence d'un point chaud non valorisé dans l'habitation.

➤ **Synthèse des données en température et en humidité relative relevées sur site**

L'encadré suivant propose un récapitulatif des principales observations concernant l'évolution de la température et de l'humidité relative dans les trois logements étudiés sur site pendant la période hivernale 2010-2011.

Généralités :

- ⇒ Conditions extérieures normales d'hiver avec $T_{\text{ext}} < 0^{\circ}\text{C}$ et $Hr_{\text{ext}} \approx 100\%$
- ⇒ Humidité relative satisfaisante allant de 30% à 70% dans les pièces principales des logements
- ⇒ Humidité relative inférieure de 5% en moyenne dans le salon par rapport aux chambres à l'étage
- ⇒ Température parfois insuffisante allant de 16°C à 24°C dans les pièces principales des logements

Logement I :

- ⇒ Température satisfaisante allant de 19°C à 24°C dans le salon et supposée telle au RdC
- ⇒ Température satisfaisante allant de 17°C à 22°C dans les chambres à l'étage ($< 2^{\circ}\text{C}$ au RdC)
- ⇒ Humidité relative satisfaisante et plus faible de 5 à 10% par rapport aux logements J et K

Logement J :

- ⇒ Température souvent insatisfaisante allant de 16°C à 22°C dans l'ensemble des pièces principales
- ⇒ Température identique dans le salon et dans les chambres au RdC ou à l'étage
- ⇒ Marques importantes d'humidité sur les parois extérieures traduisant des défauts d'enveloppe
- ⇒ Humidité relative satisfaisante à l'intérieur du logement

Logement K :

- ⇒ Température satisfaisante allant de 18°C à 23°C dans le salon et dans la chambre au RdC
- ⇒ Température satisfaisante allant de 16°C à 21°C dans les chambres à l'étage ($< 2^{\circ}\text{C}$ au RdC)
- ⇒ Occupants habitués à dormir avec les fenêtres ouvertes
- ⇒ Présence d'un convecteur électrique supplémentaire dans la chambre au RdC
- ⇒ Humidité relative satisfaisante à l'intérieur du logement

En conclusion, le système combiné de chauffage et de ventilation fonctionne correctement sur site dans le logement I et doit permettre de répondre aux besoins du logement J une fois que les défauts d'enveloppe de cette habitation seront corrigés, mais il est nécessaire d'effectuer des mesures dans un environnement contrôlé pour être à même de comparer les consommations du système combiné par rapport à un système de référence et déduire des informations pertinentes de ces relevés.

3.4.4. Analyse du taux de CO dans l'air de ventilation en aval du conduit échangeur

Dans les logements I et J, les enregistreurs de CO sont placés en aval du conduit échangeur à l'intérieur de la gaine métallique rigide de ventilation. Ils enregistrent ainsi le taux de CO contenu dans l'air de ventilation réchauffé qui est ensuite soufflé dans les chambres. Pour le logement K, l'enregistreur est placé dans le local technique en bas, ce qui permet d'évaluer le taux de CO dans cet espace contenant le conduit de cheminée et de vérifier qu'il n'existe pas de fuite à ce niveau.

Toutefois, il aurait été souhaitable de disposer aussi d'un enregistreur de CO dans la gaine de ventilation apportant l'air neuf dans les chambres du logement K pour effectuer une comparaison plus juste portant uniquement sur la qualité de l'air soufflé.

De manière générale, on observe sur le graphique de la Figure 3.61 qu'aucune trace de CO n'est relevée dans le local technique du RdC contenant le conduit de cheminée du logement K (courbe verte), mais qu'en revanche des traces de CO sont mesurées dans l'air de ventilation en aval des CETP situés dans les logements I (courbe bleue) et J (courbe rouge).

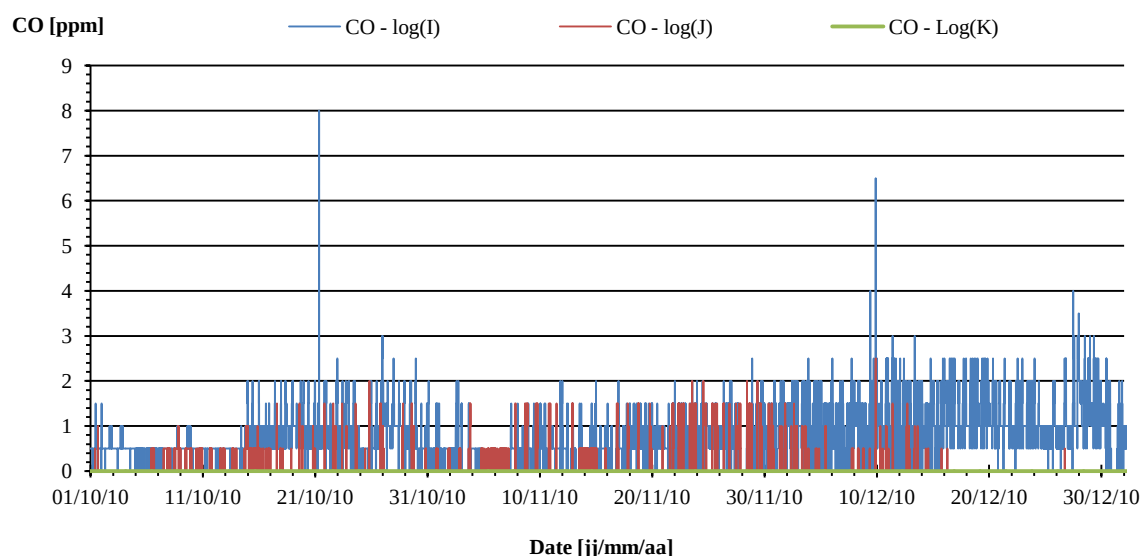


Figure 3.61 : Relevé des 3 enregistreurs EL-USB-CO300 entre le 01/10/2010 et le 31/12/2010

Pour les logements I et J, le niveau de CO mesuré dans l'air de ventilation à destination des différentes chambres reste majoritairement inférieur à 3ppm. Si ce niveau reste tout à fait acceptable et reste largement en dessous du seuil d'alerte de 50 ppm dans l'environnement d'un appareil à combustion, les pics dépassant 5 ppm nous invitent à rester particulièrement attentifs à l'évolution du taux de CO dans l'air distribué dans les chambres au fur et à mesure des hivers.

À ce titre, la mise en place d'un détecteur de CO en plus d'un détecteur avertisseur autonome de fumée (DAAF) doit être l'une des priorités du bailleur social, car cette action permet de réduire de 90% le risque de mortalité si un incendie se déclare dans le logement.

Pour la suite de l'analyse et compte tenu de la présence d'un appareil à combustion dans le logement, il est intéressant de vérifier s'il existe ou non un lien entre la présence des traces de CO mesurés dans l'air de ventilation et le fonctionnement du poêle à granulés.

Mise en évidence de la relation entre le fonctionnement du poêle à granulés et la présence de CO

Les deux graphiques de la figure suivante donnent une superposition des mesures du taux de CO dans l'air de ventilation en aval du CETP dans les logements I et J avec celles de la puissance consommée par le poêle à granulés dans ces deux logements.

Le relevé des traces de CO (courbe noire) dans l'air de ventilation soufflé dans les chambres apparaît ainsi être directement corrélé au fonctionnement et donc aux pics de puissance (courbe rouge) du poêle à granulés de bois.

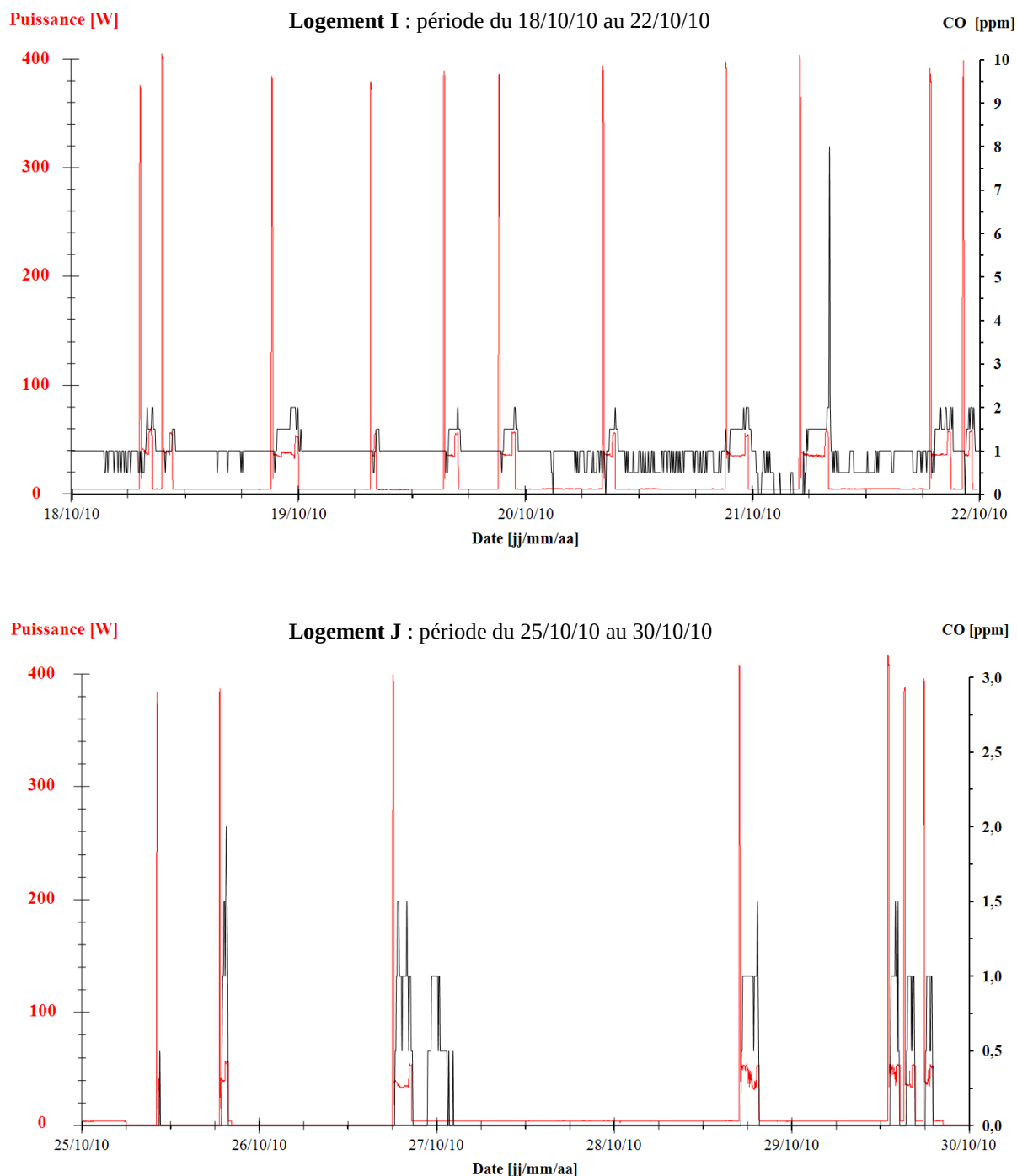


Figure 3.62 : Superposition des courbes de fonctionnement du poêle et de mesure de CO en aval du CETP

On peut également noter que lorsque le poêle à granulés est en veille, les mesures dans le logement I indiquent un taux moyen de CO d'environ 1 ppm dans l'air de ventilation en aval du CETP, tandis que celles relevées dans le logement J révèlent un taux de CO strictement nul. Ces différences restent cependant à la fois très faibles et proches de la résolution du capteur de CO.

Il apparaît ensuite que les valeurs de CO ont tendance à augmenter de manière systématique jusqu'à 1,5 ou 2 ppm à la toute fin de chaque cycle de nettoyage du poêle à granulés en fin de combustion, lorsque le ventilateur s'arrête, qu'il n'y a donc plus de contrôle de l'arrivée d'air et que les dernières braises se consomment en défaut d'oxygène, c'est-à-dire en combustion incomplète.

Ainsi, c'est pendant une de ces phases d'arrêt du poêle à granulés qu'est relevé le 21/10/10 un pic de CO atteignant 8 ppm dans l'air de ventilation destinée aux chambres du logement I. Cependant, même si cette valeur s'avère être plus importante que celles relevées en moyenne et nous invite à étendre la surveillance de l'évolution de la présence de CO dans l'air de ventilation au cours des prochains hivers, le niveau de CO mesuré dans l'air distribué dans les chambres des logements I et J reste toujours inférieur à 10 ppm, ce qui est bien en dessous des 50 ppm qui marquent le premier seuil d'alerte quant à la présence de ce gaz toxique dans un logement.

En synthèse, cette analyse montre bien qu'il existe une relation directe entre le fonctionnement du poêle à granulés, et plus particulièrement sa mise en arrêt, et la mesure de traces de CO dans l'air de ventilation en aval du conduit échangeur, ce qui met en évidence les limites de l'étanchéité au niveau du tube central du dernier prototype de CETP en deux parties. Toutefois, le niveau mesuré est ici extrêmement faible et même si certaines valeurs nous invitent à conserver une certaine vigilance sur les conditions d'évolution à long terme de l'étanchéité du CETP au niveau de la jonction des deux parties, le couplage entre le système de ventilation et le CETP intégré au conduit de cheminée du poêle à granulés ne présente aucun risque pour les occupants des logements dans lesquels il est installé.

Conclusion et Perspectives

L'objectif principal de ce travail consistait à développer et à caractériser un nouveau système permettant de combiner les avantages d'une solution de chauffage au bois avec l'utilisation de l'air comme unique vecteur énergétique pour assurer à la fois les besoins de renouvellement d'air et de chauffage dans une habitation de type BBC, tout en y garantissant une bonne qualité de l'air intérieur, ainsi que le confort et la sécurité des occupants.

L'étude du contexte et des enjeux favorisant l'émergence de ce type de système, ainsi que les observations issues des premiers essais réalisés avec un insert à bois bûches, ont permis d'établir le cahier des charges d'un nouveau produit, de type échangeur de chaleur, valorisant une partie de la chaleur initialement perdue par les fumées de combustion d'un appareil de chauffage au bois de petite puissance. Ainsi, plusieurs prototypes de conduit échangeur à triple paroi, pouvant s'intégrer à la fois au conduit de cheminée d'un poêle à granulés de bois et au réseau de soufflage d'une VMC double flux, ont été développés en partenariat avec l'industriel POUJOLAT, spécialisé dans la fabrication de sortie de toit et de conduit de fumée métalliques.

Le choix d'un poêle à granulés de bois affichant une faible puissance et de larges possibilités de régulation s'est tout d'abord imposé pour répondre aux contraintes des habitations de type BBC et aux besoins de cette étude. Ensuite, la configuration de couplage des trois composants principaux du système combiné a été précisée, en tenant compte de la volonté de pulser l'air au sein du conduit échangeur pour limiter tout risque d'aspiration des produits de combustion en cas de fuite du système. Des essais aérauliques ont également été réalisés pour vérifier que le dimensionnement des diamètres des trois tubes constituant le conduit échangeur limitait bien les pertes de charge introduites sur l'air de ventilation et l'air de combustion, tout en conservant des conditions optimales d'évacuation des fumées. À ce stade, le principe de fonctionnement du système combiné de chauffage et de ventilation développé dans ce travail a été défini et validé, de telle sorte qu'il permet de récupérer sur l'air de ventilation soufflé par une VMC double flux, une partie de la chaleur portée par les fumées et par l'air de combustion circulant dans le conduit de cheminée concentrique d'un poêle à granulés de bois.

Le protocole et la métrologie utilisée lors des essais de caractérisation des performances des prototypes ont ensuite été définis et les résultats obtenus avec les premiers prototypes de conduit échangeur ont montré que l'échange thermique s'effectuait principalement entre les fumées et l'air de ventilation, tandis que l'échange du côté de l'air de combustion était assez réduit, mais que cette configuration d'écoulement permettait de limiter les déperditions vers l'environnement extérieur. Lors de ces essais, le positionnement du conduit échangeur au plus près du poêle à granulés a été mis en évidence pour profiter au maximum du potentiel thermique des fumées. Par ailleurs, il s'est avéré nécessaire de travailler avec un poêle à granulés de bois dont le cycle de combustion est parfaitement étanche pour assurer le bon fonctionnement du système combiné.

Ensuite, compte tenu des valeurs moyennes de puissance récupérée par l'air de ventilation au sein du conduit échangeur, qui s'établissent entre 300 et 350 W et qui apparaissent limitées par un coefficient d'échange global du côté des fumées évalué entre 1,5 et 2,0 W/K, le choix est fait d'augmenter la surface d'échange grâce à un allongement significatif du conduit échangeur. D'autres propositions visant l'amélioration des coefficients d'échanges thermiques ont été discutées, mais n'ont pas été retenues de manière à conserver un compromis viable en termes de coût d'investissement pour l'industriel par rapport aux performances escomptées.

Ainsi, un nouveau prototype constitué de deux parties présentant un emboîtement à triple paroi a été développé. Les bons résultats obtenus lors des tests d'étanchéité menés sur le dernier prototype de conduit échangeur composé de deux parties ont permis de valider le processus industriel de fabrication de cet élément et d'apporter une garantie supplémentaire quant-à la sécurité de fonctionnement du système pour les occupants.

À ce stade, l'industriel a fait le choix de déposer une demande de brevet au niveau national pour protéger et valoriser l'innovation portée par ce type de conduit échangeur à triple paroi. À ce titre, la figure suivante donne une vue de l'illustration principale de l'abrégé du brevet n°1052904 déposé le 16 avril 2010. L'extension européenne n°11305444.9 a été demandée le 14 avril 2011.

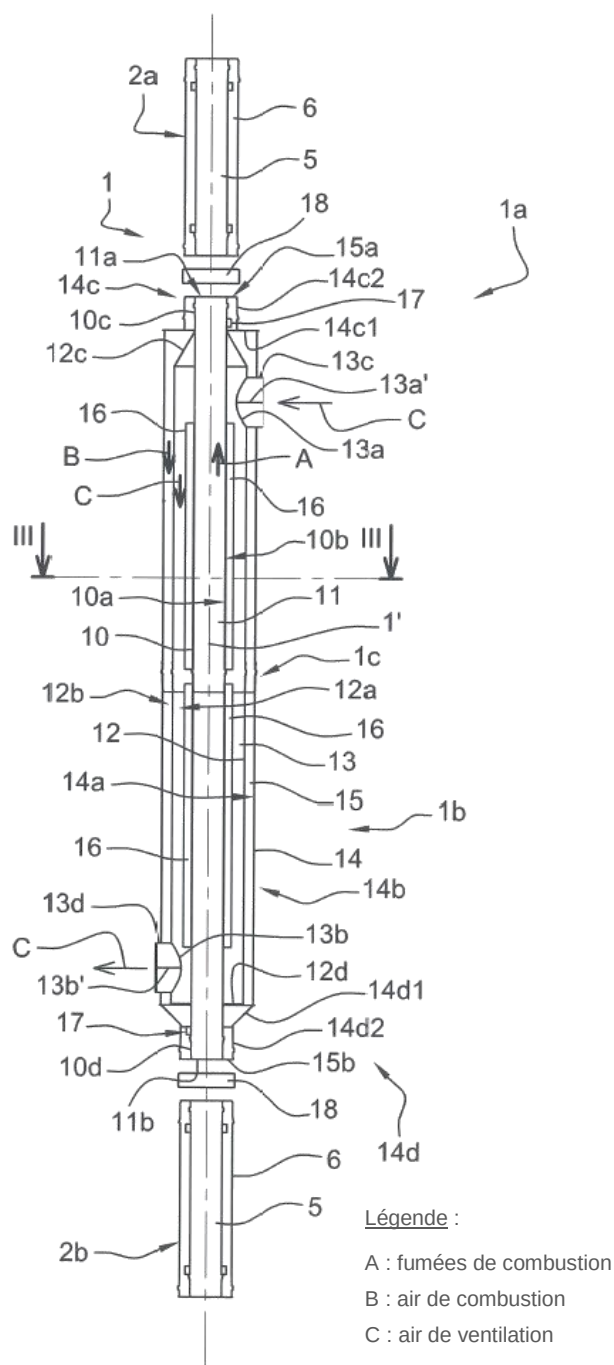


Figure 3.63 : Vue de l'illustration principale de l'abrégé du brevet déposé sur le CETP

Parallèlement, un modèle mathématique d'échangeur de chaleur à triple tube concentrique non isolé de son environnement extérieur a été développé pour prévoir les performances des échanges thermiques qui s'opèrent en régime permanent au sein du dernier prototype de conduit échangeur entre les fumées de combustion, l'air de ventilation, l'air de combustion et l'environnement extérieur. Une étude paramétrique a ensuite été conduite en se basant sur des paramètres d'entrée issus des mesures expérimentales et elle a permis d'apprécier l'influence d'une variation des différents paramètres sur les performances du conduit échangeur et d'être à même de justifier certains choix de conception, tels que l'introduction d'ailettes sur la surface externe du tube central transportant les fumées ou encore la faible influence de l'isolation du conduit échangeur sur la puissance récupérée par l'air de ventilation.

Puis, de nouveaux essais ont été réalisés pour caractériser l'ensemble du système combiné de ventilation et de chauffage au bois. Les essais menés en laboratoire avec les deux derniers prototypes de conduit échangeur ont ainsi permis d'établir les contraintes de mise en œuvre et les performances globales du système combiné. Ils ont montré qu'il était possible de récupérer une puissance d'environ 500 W sur l'air de ventilation, ce qui permet de couvrir les pertes par renouvellement d'air d'une habitation de type BBC équipée d'une VMC double flux à haut rendement. Il a aussi été établi que la recherche d'une amélioration de l'efficacité de l'échange au sein du conduit échangeur ne devait pas nuire à la bonne évacuation des fumées qui doivent conserver un potentiel suffisant pour réchauffer l'air de combustion admis via l'espace annulaire des éléments concentriques de cheminée situés au dessus du conduit échangeur. De plus, la validation expérimentale du modèle mathématique a été obtenue grâce au bon accord entre les valeurs calculées et mesurées des puissances thermiques transférées ainsi que celles de l'efficacité de l'échange au sein du dernier prototype de conduit échangeur à triple paroi non isolé de son environnement extérieur.

Le système combiné a ensuite été installé sur site dans deux habitations de type T5 en partenariat avec un bailleur social chargé d'une opération de construction de logements BBC près de Poitiers. Un poêle à granulés de bois à combustion étanche d'une puissance nominale réduite à 6 kW, contre 9 kW pour le modèle utilisé en laboratoire, a été retenu pour répondre aux besoins des habitations sans provoquer de surchauffe dans la pièce principale où il est installé. L'instrumentation des logements a permis d'effectuer le suivi des températures dans les différentes pièces de vie et des consommations énergétiques liées au fonctionnement du poêle à granulés et de l'unité de ventilation.

Les résultats obtenus ont montré la bonne tenue du système combiné en fonctionnement réel avec le respect des critères de confort en termes d'humidité relative et de température, sauf dans un logement présentant des défauts importants au niveau de son enveloppe, signe que ce type de système n'est bien adapté que pour des habitations à très hautes performances énergétiques. En outre, la comparaison des performances du système combiné par rapport à un troisième logement identique mais non équipé d'un conduit échangeur n'a pas pu être établie de manière pertinente, compte tenu d'un défaut de relevé de la consommation en granulés de la part de certains occupants, mais surtout du fait de la grande variabilité des conditions d'usage dans chaque habitation, avec des consommations énergétiques qui dépendent fortement du comportements et des habitudes des occupants. Des essais complémentaires en environnement contrôlés sont donc indispensables pour être à même de mieux juger les performances du système combiné en fonctionnement.

Sur site, le soin particulier qui a été apporté pour traiter les problématiques acoustiques liées au soufflage de l'air de ventilation semble avoir donné satisfaction aux occupants. L'appropriation du système par ces derniers a été convaincante, même s'il est apparu que le poêle à granulés devait être programmé pour limiter la baisse en température du logement lors d'une période d'absence prolongée.

Enfin, une relation notable a été identifiée entre le fonctionnement, ou plutôt la mise en arrêt au terme de la phase de fonctionnement, du poêle à granulés et la détection de traces minimales de CO dans l'air de ventilation en aval du conduit échangeur, ce qui nous invite à conserver une certaine prudence et un suivi régulier de ce type de système pour assurer une sécurité complète des occupants.

En termes de perspectives, la prochaine phase qui s'inscrit logiquement dans la continuité de ce travail consiste à intégrer les différents composants du système combiné dans un outil de simulation thermique dynamique du bâtiment pour établir par calcul l'influence de l'emploi de ce type de système combiné en comparaison de systèmes couramment installés dans les habitations de type BBC. À ce titre, la modélisation des logements de Fontaine le Comte ayant servi de support d'essais in situ a été engagée sous le logiciel TRNSYS, avec la définition des différentes zones thermiques et la prise en compte de la perméabilité de l'enveloppe. Il conviendrait ensuite d'utiliser le modèle mathématique développé dans ce travail pour définir un module de conduit échangeur à triple paroi, puis de le coupler avec un module de poêle à granulés de bois à cycle de combustion étanche et avec un module de VMC double flux à haut rendement. L'intégration de ces différents modules dans l'environnement de simulation et la vérification de leur couplage avec le modèle multizone du bâtiment permettraient ensuite d'effectuer des simulations numériques pour étudier et comparer plusieurs configurations d'implantation et d'usage du système combiné, sous différentes localisations et par rapport à différents systèmes conventionnels de chauffage et de ventilation. Par ailleurs, des bilans de consommation en énergie primaire pourraient être établis pour préciser l'intérêt du système combiné et conduire à une estimation de la durée de retour sur investissement pour ce type de solution.

Concernant la caractérisation des échanges thermiques au sein du conduit échangeur à triple paroi, une évaluation plus fine des transferts par rayonnement et par convection naturelle pourrait être engagée, ainsi qu'une méthodologie permettant une meilleure prise en compte des transferts ayant lieu dans chacune des zones d'entrée et de sortie du conduit échangeur.

L'amélioration des transferts thermiques sur l'air de ventilation au sein du conduit échangeur pourrait aussi être obtenue grâce à l'introduction d'un turbulateur dans le tube central d'évacuation des fumées et à l'utilisation de tubes à surface corruguée du côté de l'air de ventilation pour accroître la turbulence des écoulements, donc le coefficient d'échange global. Il serait également intéressant d'étudier plus précisément les possibilités d'extension de la surface d'échange entre les fumées et l'air de ventilation, en remplissant par exemple l'espace annulaire dans lequel circule l'air par des éléments formant une zone d'écoulement en nid d'abeille. Suite à l'amélioration des performances de l'échange, il conviendrait alors de veiller à éviter tout risque de condensation des fumées et d'évaluer, dans tous les cas, les conditions de maintenance propres à ce type de composant.

D'un point de vue de la tenue dans le temps de ce type de système et suite aux observations mettant en évidence la présence de traces minimales de CO dans l'air de ventilation en aval du conduit échangeur, il conviendrait de programmer une étude complète portant sur la sécurité, la durabilité et les conditions d'usage d'un tel système, allant même jusqu'à l'évaluation de son acceptabilité à long terme et à l'analyse multicritère du confort ressenti par les occupants.

Par ailleurs, pour répondre à une demande plus large, le système combiné développé ici pourrait profiter des prochaines évolutions des deux composants que sont l'appareil de chauffage au bois et l'unité de ventilation à récupération de chaleur. Ainsi, certains poêles proposent une utilisation mixte du combustible bois, c'est-à-dire en bûches ou en granulés, mais aussi un fonctionnement mixte, c'est-à-dire manuel ou automatique, pour limiter la dépendance électrique de l'appareil. Des solutions

de réduction des émissions de poussières liées à ce type de chauffage constitueraient également une valeur ajoutée importante. En outre, le recours à un poêle bouilleur possédant un module hydraulique qui permet de couvrir une partie des besoins en eau chaude sanitaire de l'habitation et qui peut être associée à une production solaire thermique pourrait aussi venir compléter efficacement le système.

Ensuite, la réduction des consommations électriques des auxiliaires motorisés pourrait faire l'objet d'études supplémentaires, avec par exemple, une alimentation photovoltaïque des organes électriques du système ou encore une traduction de cette problématique en termes de limitation des pertes de charge dans le réseau de ventilation. Pour ce cas, il conviendrait de généraliser les conditions propices à une organisation judicieuse des points de soufflage et d'extraction dans les habitations pour réduire l'étendue du réseau, ainsi que d'adopter des conduites et gaines à surface intérieure lisse et qui soient isolées de l'extérieur, ou encore d'utiliser des diffuseurs à fort taux d'induction pour un meilleur brassage de l'air et pour une extension des possibilités de soufflage. Enfin, l'utilisation d'un échangeur enthalpique à haut rendement dans l'unité de ventilation permettrait d'éviter tout risque d'assèchement de l'air au sein d'une habitation équipée d'un tel système.

Les perspectives de ce travail s'étendent également à l'étude des différentes possibilités de contrôle et de régulation de ce type de chauffage ayant recours au seul vecteur air. À ce titre, les projets VABAT et VAICTEUR AIR² actuellement en cours peuvent être cités, car ils tiennent pour objectif d'étudier avec précision les conditions et les techniques appropriées à une bonne diffusion et à une haute qualité de l'air au sein des habitations de type BBC chauffées à l'air.

En conclusion générale, le système combiné de ventilation et de chauffage au bois, qui a été développé dans le cadre de ce travail, constitue une solution pertinente pour assurer à la fois le chauffage et la ventilation dans des habitations de type BBC, qui deviennent peu à peu la norme en France, aussi bien en construction qu'en réhabilitation. Ce type de système a pu être réalisé grâce au développement d'un conduit échangeur à triple paroi intégré au conduit de fumée d'un poêle à granulés de bois et connecté au réseau de soufflage d'une VMC double flux. Cette alliance inédite permet ainsi de conjuguer les avantages de deux systèmes au fonctionnement déjà éprouvé et dont l'utilisation est promise à un essor important dans les habitations de type BBC.

Cette innovation s'est concrétisée par le dépôt d'un brevet sur le conduit échangeur à triple paroi et des réflexions sont actuellement menées par le partenaire industriel pour préciser les modalités de sa mise sur le marché courant 2012, ainsi que de sa présentation lors d'un ou de plusieurs salons. La valorisation de cette solution au regard de la RT 2012 est également à l'étude avec une interrogation quant à la nécessité ou non de demander un Titre V « Système » auprès de l'administration concernée. Une demande d'avis technique concernant la mise en œuvre du système est également envisagée. Enfin, de nouveaux tests in situ du système combiné sont en cours, avec notamment un chantier test sur Niort dans une maison neuve de type BBC qui sera instrumentée et pour laquelle il sera possible de connaître avec précision le comportement et les habitudes de consommation des occupants.

Bibliographie

- [ADEME_Bât, 2011] ADEME_Bât, Les Chiffres Clés du Bâtiment 2010, 7 avril 2011, www2.ademe.fr
- [ADEME_Bois_ACV, 2005] Bilan environnemental du chauffage domestique au bois - Note de synthèse, ADEME, Bio Intelligence Service, Décembre 2005.
- [ADEME_Bois_Air, 2009] Le bois énergie et la qualité de l'air - Note de synthèse, ADEME, DGEC, Juillet 2009, 17p.
- [ADEME_Bois_NRJ, 2009] L'utilisation du bois énergie dans l'habitat, ADEME, Mai 2009.
- [ADEME_Bois_PCI, 2001] Mesure des caractéristiques des combustibles bois, ADEME, Critt Bois, Fibois, CTBA, Juillet 2001.
- [ADEME_Bois_R&D, 2009] Chauffage au bois : du progrès dans l'air, ADEME, Février 2009, 4p.
- [ADEME_R&D, 2009] Influence du système d'évacuation des fumées sur le rendement d'un chauffage domestique au bois, ADEME, CERIC, LNE, TECHNOVA, www.laboratoire-ceric.com/pdf/Influence_conduit.pdf
- [AFH2, 2007] AFH2, Association Française de l'Hydrogène, Situation mondiale de l'énergie - Fiche 2.1 révisée, www.afh2.org
- [AFNOR, 2006] NF EN 14785 : Appareil de chauffage domestique à convection à granulés de bois : exigences et méthodes d'essai, Août 2006
- [Afshari, 2005] A. Afshari et N.C. Bergsøe, Reducing energy consumption for ventilation in dwellings through demand controlled ventilation, presented at Indoor Air, Beijing, China (2005).
- [Aldes, 2010] Températion Domestique Aldes, Solution T. Zen, Aldes, 2010, www.temperation.com
- [Ameel, 2000] T.A. Ameel, Parallel-Flow Heat Exchangers with Ambient Thermal Interaction, *Heat Transfer Engineering* 21 (6) (2000) 18-25.
- [Anses, 2006] Intoxication au monoxyde de carbone - Pathologies, Anses, Mounia El Yamani, Janvier 2006.
- [Anses, 2011] Air intérieur - valeurs guides, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 29 juin 2011, www.afsset.fr
- [Arrêté_CIDD, 2010] Arrêté du 30 décembre 2010 pris pour l'application de l'article 200 quater du code général des impôts relatif au crédit d'impôt sur le revenu en faveur des dépenses d'équipement de l'habitation principale au titre des économies d'énergie et du développement durable et modifiant l'article 18 bis de l'annexe IV à ce code, version consolidée au 01 janvier 2011, JORF n°0303 du 31/12/2010, page 23616.
- [Arrêté_CO, 2009] Arrêté du 23 février 2009 relatif à la prévention des intoxications par le monoxyde de carbone dans les locaux à usage d'habitation, pris pour l'application des articles R. 131-31 à R. 131-37 du code de la construction et de l'habitation, JORF n°0049 du 27/02/2009, page 3476.
- [Arrêté_Conduit, 2005] Arrêté du 31 octobre 2005 relatif aux dispositions techniques pour le choix et le remplacement de l'énergie des maisons individuelles, JORF n°265 du 15/11/2005, page 17821.
- [Arrêté_COS, 2007] Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux conditions à remplir pour bénéficier du dépassement de coefficient d'occupation des sols en cas de respect d'exigences de performance énergétique par un projet de construction, pris pour l'application de l'article R. 111-21 du code de la construction et de l'habitation, JORF n°112 du 15/05/2007, page 8908.
- [Arrêté_COV, 2011] Arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils, JORF n°0111 du 13/05/2011, page 8284.
- [Arrêté_DPEloc, 2010] Arrêté du 3 mai 2007 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants à usage principal d'habitation proposés à la location en France métropolitaine, version consolidée au 17 mai 2007, JORF n°114 du 17/05/2007, page 9525.
- [Arrêté_DPNeuf, 2007] Arrêté du 21 septembre 2007 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments neufs en France métropolitaine, version consolidée au 29 décembre 2007, JORF n°0301 du 28/12/2007, page 21537.

- [Arrêté_DPEevente, 2010] Arrêté du 11 octobre 2010 modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine, version consolidée au 01 novembre 2010, JORF n°0254 du 31/10/2010 page 19592.
- [Arrêté_HPEex, 2009] Arrêté du 29 septembre 2009 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique rénovation », version consolidée au 02 octobre 2009, JORF n°0227 du 01/10/2009, page 15901.
- [Arrêté_HPEneuf, 2007] Arrêté du 3 mai 2007 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique », version consolidée au 16 mai 2007, JORF n°112 du 15/05/2007, page 8909.
- [Arrêté_Incendie, 1986] Arrêté du 31 janvier 1986, modifié par les arrêtés du 18 août 1986 et du 19 décembre 1988, relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation, JORF du 09/09/1986.
- [Arrêté_NRA, 1994] Arrêté du 28 octobre 1994, modifié par les 2 arrêtés du 30 juin 1999, relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation, version consolidée au 17 juillet 1999, JORF n°273 du 25/11/1994, page 16693.
- [Arrêté_RT2005, 2006] Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments (RT 2005), JORF n°121 du 25/05/2006, page 7747.
- [Arrêté_RT2012, 2010] Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments (RT 2012), version consolidée au 28 octobre 2010, JORF n°0250 du 27/10/2010, page 19260.
- [Arrêté_RTex, 2007] Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants (RT Existant "par élément"), version consolidée au 17 mai 2007, JORF n°114 du 17/05/2007 page 9538.
- [Arrêté_RTex, 2008] Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1 000 mètres carrés, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants (RT Existant "globale"), version consolidée au 09 août 2008, JORF n°0184 du 08/08/2008 page 12656.
- [Arrêté_TitreV, 2009] Arrêté du 9 juin 2009 relatif à l'agrément de la demande de titre V relative à la prise en compte des appareils indépendants de chauffage à bois dans le cadre de la réglementation thermique 2005, version consolidée au 28 juin 2009, JORF n°0147 du 27/06/2009, page 10766.
- [Arrêté_Vent, 1982] Arrêté du 24 mars 1982, modifié par l'arrêté du 28 octobre 1983, relatif à l'aération des logements : aération générale ou permanente, aération permanente pouvant être limitée à certaines pièces, JORF du 27/03/1982, page 942.
- [Aulds, 1966] D.D. Aulds, An Analytical Method for the Design of a Three-Channel Heat Exchanger for Cryogenic Applications, MS thesis, Louisiana Polytechnic Institute, Ruston, Louisiana (1966)
- [Awbi, 2003] H.B. Awbi, Ventilation of buildings, Taylor & Francis (2003) 522p.
- [BP, 2011] BP, Statistical Review of World Energy 2011, www.bp.com
- [Brundtland, 1987] G.H. Brundtland, Notre avenir à tous - Rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU, Avril 1987.
- [Cardonnel, 2010] C. Cardonnel, Pour une réglementation énergétique du bâtiment équilibrée : RT ou RE 2012 ?, 31 mai 2010, www.cardonnel-cube.fr
- [CCNUCC, 1992] CCNUCC, Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, <http://unfccc.int>
- [COM_Biomasse, 2005] Communication de la Commission - Plan d'action dans le domaine de la biomasse, 7 décembre 2005, JO C049 du 28/02/2005.
- [Comop_n°10, 2008] Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale 2008-2012-2020, Rapport final du Comité opérationnel n°10, Novembre 2008, 59p.
- [Concannon, 2002] P. Concannon, Residential ventilation, AIVC Technical note 57, Coventry, UK, 2002.
- [COSTIC_Bois, 2005] La réglementation en matière de chauffage domestique au bois, COSTIC, ADEME, FFB, 2005, 14p.

- [CSC, 2000] CSC, Avis du 8 novembre 2000 relatif aux dispositifs de redistribution d'air chaud, Commission de la Sécurité des Consommateurs, Paris (2000), <http://www.cscnet.org/article230.html>
- [CSTB_ATec, 2008] Avis Technique 14/08-1276 Palazzetti, GS14 CSTB, 9 septembre 2008, www.cstb.fr/pdf/atec/GS14-O/AO081276.pdf
- [CSTB_ATec, 2011] Rechercher un Avis Technique - Portail CSTB, Septembre 2011, www.cstb.fr/evaluations/atec-et-dta
- [CSTB_Cahier, 2008] CSTB, Systèmes de ventilation hygroréglables, Cahier des prescriptions techniques communes, GS n°14, e-cahier n°3615 du CSTB, 2008.
- [Décret_Bois, 2010] Décret n°2010-273 du 15 mars 2010 relatif à l'utilisation du bois dans certaines constructions, version consolidée au 18 mars 2010, abrogeant le décret n°2005-1647 du 26 décembre 2005, JORF n°301 du 28/12/2005, page 20086.
- [Décret_CEE, 2010] Décret n°2010-1664 du 29 décembre 2010 relatif aux certificats d'économies d'énergie, version consolidée au 01 janvier 2011, JORF n°0302 du 30/12/2010, page 23224.
- [Décret_Chaudières, 2009] Décret n°2009-649 du 9 juin 2009 relatif à l'entretien annuel des chaudières dont la puissance nominale est comprise entre 4 et 400 kilowatts, version consolidée au 12 juin 2009, JORF n°0133 du 11/06/2009, page 9461.
- [Décret_CO, 2008] Décret n°2008-1231 du 27 novembre 2008 relatif à la prévention des intoxications par le monoxyde de carbone, JORF n°0278 du 29/11/2008, page 18225.
- [Décret_COV, 2011] Décret n°2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils, version consolidée au 26 mars 2011, JORF n°0071 du 25/03/2011, page 5343.
- [Décret_DAAF, 2011] Décret n°2011-36 du 10 janvier 2011 relatif à l'installation de détecteurs de fumée dans tous les lieux d'habitation, version consolidée au 12 janvier 2011, JORF n°0008 du 11/01/2011, page 573.
- [Décret_LDD, 2007] Décret n°2007-161 du 6 février 2007 relatif au livret de développement durable, version consolidée au 01 janvier 2007, JORF n°33 du 08/02/2007, page 2419.
- [Décret_PTZ+, 2010] Décret n°2010-1704 du 30 décembre 2010 relatif aux prêts ne portant pas intérêt consentis pour financer la primo-accession à la propriété, version consolidée au 01 janvier 2011, JORF n°0303 du 31/12/2010, page 23414.
- [Décret_RT2005, 2006] Décret n°2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions (RT 2005), version consolidée au 25 mai 2006 JORF n°121 du 25/05/2006, page 7744.
- [Décret_RT2012, 2010] Décret n°2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions (RT 2012), version consolidée au 28 octobre 2010, JORF n°0250 du 27/10/2010, page 19250.
- [Décret_Scellier, 2011] Décret n°2011-520 du 13 mai 2011 pris pour l'application de l'article 105 de la loi n° 2010-1657 du 29 décembre 2010 de finances pour 2011, version consolidée au 16 mai 2011, JORF n°0113 du 15/05/2011, page 8461.
- [Décret_TFPB, 2009] Décret n°2009-1529 du 9 décembre 2009 pris pour l'application de l'article 1383-0 B bis du code général des impôts relatif à l'exonération de taxe foncière sur les propriétés bâties des constructions de logements neufs à haut niveau de performance énergétique JORF n°0287 du 11/12/2009, page 21444.
- [DGS, 2009] Intoxications par le monoxyde de carbone : première cause de mortalité accidentelle par toxique, Communiqué de presse, 18 décembre
- [DIR_EE, 2006] Directive 2006/32/CE du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et abrogeant la directive 93/76/CEE (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), JO L114 du 27/04/2006, 64-85.
- [DIR_EnR, 2009] Directive 2009/28/EC du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), JO L140 du 05/06/2009, 16-62.
- [DIR_PEB, 2002] Directive 2002/91/CE du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments, JO L001 du 04/01/2003, 65-71.

- [DIR_PEB, 2010] Directive 2010/31/UE du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments, JO L153 du 18/06/2010 (Refonte).
- [DPE, 2011] Communiqué de presse ministériel : 6 mesures pour améliorer et fiabiliser le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE), 13 septembre 2011.
- [DTU_68.1, 1995] DTU 68.1 (norme française XP P50-410), Installations de ventilation mécanique contrôlée – Règles de conception et de dimensionnement, Juillet 1995.
- [DTU_68.2, 1993] DTU 68.2 (normes françaises NF P50-411-1 et NF P50-411-2), Exécution des installations de ventilation mécanique – Cahier des clauses techniques (Partie 1) et Cahier des clauses spéciales (Partie 2), Mai 1993.
- [Effinergie, 2008] Réussir un projet de Bâtiment Basse Consommation - Des clés pour des logements neufs confortables et économes en énergie, Décembre 2008, www.effinergie.org
- [Effinergie, 2009] Règles techniques de la marque Effinergie applicables aux bâtiments neufs faisant l'objet d'un label BBC Effinergie, 24 novembre 2009, www.effinergie.org
- [Effinergie, 2011] Référentiel proposé par Effinergie aux régions lançant leurs appels à projet BBC+ et BEPOS, Avril 2011, www.effinergie.org
- [Enerdata, 2011] Enerdata, Statistiques et Veille Énergie, www.enerdata.net
- [Feist, 2001] W. Feist, S. Peper et M. Görg, Final Technical Report, CEPHEUS, 127p, July 2001.
- [Feist, 2005] W. Feist, J. Schnieders, V. Dorer et A. Haas, Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept, *Energy and Buildings* 37 (11) (2005) 1186-1203.
- [Flamme_Verte, 2011] Charte de qualité "Flamme Verte" - Appareils de chauffage indépendants au bois, Janvier 2011, www.flammeverte.org
- [Fondis, 2009] Cheminée à Technologie Multi-Énergie (TME), Fondis 2009, www.fondis.com
- [Fraefel, 2000] R. Fraefel, H. Huber et M. Trawnika, L'aération dans les bâtiments MINERGIE - Guide de conception, Association MINERGIE et CLIMA SUISSE, Novembre 2000.
- [García-Valladares, 2004] O. García-Valladares, Numerical simulation of triple concentric-tube heat exchangers, *International Journal of Thermal Sciences* 43 (10) (2004) 979-991.
- [GIEC, 2007] GIEC, 4ième Rapport d'Évaluation sur les Changements Climatiques (RE-4), 17 novembre 2007.
- [GIEC, 2011] Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et les mesures d'atténuation du changement climatique - Résumé à l'intention des décideurs, 9 mai 2011.
- [Grenelle, 2007] Engagements numérotés du Grenelle Environnement, www.legrenelle-environnement.fr
- [Hollmuller, 2002] P. Hollmuller, Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, Faculté des Sciences de l'Université de Genève, N. Gisin, (2002) 130p.
- [HQE, 2009] Référentiels d'évaluation de la démarche HQE à partir de 2010, 15 septembre 2009, <http://assohqe.org>
- [HQE, 2011] Passeport Bâtiment Durable, un nouvel affichage environnemental HQE, Conférence de presse du 20 septembre 2011, Paris, www.assohqe.org
- [IEA, 2010] IEA, World Energy Outlook 2010, www.iea.org/weo
- [IFN, 2005] Bois énergie : les forêts ont de la ressource ! L'IF n°9, Septembre 2005.
- [IFN, 2010] La forêt française : résultats des campagnes d'inventaire 2005 à 2009, Inventaire Forestier National, Septembre 2010, www.ifn.fr
- [Incropera, 2006] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman et A.S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed, Wiley (2006) 1024p.
- [INPES, 2008] Risque d'intoxication au monoxyde de carbone (CO), Institut National de Prévention et d'Éducation pour la Santé, www.inpes.sante.fr/CO/default.html
- [INRS, 2005] Fiche toxicologique du dioxyde de carbone (CO2), Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, www.inrs.fr

- [InVS, 2010] Intoxications au monoxyde de carbone (CO), Aide-mémoire & Bulletin de surveillance, Institut de Veille Sanitaire, www.invs.sante.fr/surveillance/co
- [Jakob, 1949] M. Jakob, Heat Transfer, New York, John Wiley & Sons (1949) 552.
- [Koffi, 2009] J. Koffi, Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles, thèse de Doctorat, Université de la Rochelle, 08 juillet 2009.
- [Krishnamurty, 1964] V.V.G. Krishnamurty et C.V. Rao, Heat transfer in three-fluid heat exchangers, *Indian Journal of Technology* 2 (1964) 325–327.
- [Loi_DAAF, 2010] Loi n°2010-238 du 9 mars 2010 visant à rendre obligatoire l'installation de détecteurs de fumée dans tous les lieux d'habitation, version consolidée au 11 mars 2010, JORF n°0058 du 10/03/2010, page 4759.
- [Loi_ElecEnR, 2000] Loi n°2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité, version consolidée au 01 juin 2011, JORF n°35 du 11/02/2000, page 2143.
- [Loi_Env, 2005] Loi constitutionnelle n°2005-205 du 1er mars 2005 relative à la Charte de l'Environnement, version consolidée au 02 mars 2005, JORF n°51 du 02/03/2005, page 3697.
- [Loi_GES, 2001] Loi n°2001-153 du 19 février 2001 tendant à conférer à la lutte contre l'effet de serre et à la prévention des risques liés au réchauffement climatique la qualité de priorité nationale et portant création d'un Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre-mer, version consolidée au 03 juillet 2003, JORF n°43 du 20/02/2001, page 2783.
- [Loi_Grenelle1, 2009] Loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, version consolidée au 01 juillet 2010, JORF n°0179 du 05/08/2009, page 13031.
- [Loi_Grenelle2, 2010] Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, version consolidée au 10 septembre 2011, JORF n°0160 du 13/07/2010, page 12905 .
- [Loi_POPE, 2005] Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique (POPE), version consolidée au 01 juin 2011, JORF n°163 du 14/07/2005, page 11570.
- [Mansson, 1992] L.G. Mansson, Demand Controlled Ventilating Systems, Case studies, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, IEA, Annex 18, August 1992.
- [Minergie, 2010] Exigences Minergie pour les nouvelles constructions - Norme SIA 380/1:2009, 19 février 2010, www.minergie.ch
- [Morley, 1933] T.B. Morley, Exchange of heat between three fluids, *Engineer* 155 (1933) 134.
- [NégaWatt, 2011] Scénario négaWatt 2011 - Dossier de présentation, 29 septembre 2011, www.negawatt.org
- [NF444, 2010] Référentiel de certification - Marque NF444 Biocombustibles solides, AFNOR certification, FCBA, Décembre 2010.
- [NF_EN_7730, 2006] NF EN 7730 : Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique locaux, Ergonomie des ambiances thermiques, AFNOR, Mars 2006.
- [NF_EN_13384-1, 2008] NF EN 13384-1 : Conduits de fumée - Méthodes de calcul thermo-aéraulique - Partie 1 : Conduits de fumée ne desservant qu'un seul appareil, AFNOR, Août 2008.
- [NF_EN_13829, 2001] NF EN 13829 : Performance thermique des bâtiments - Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments - Méthode de pressurisation par ventilateur, AFNOR, Février 2001.
- [NF_EN_15251, 2007] NF EN 15251 : Critères d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique, AFNOR, Août 2007.
- [PBG_BEPOS, 2011] Vers des bâtiments à énergie positive, grand dossier du Plan Bâtiment Grenelle, page consultée en septembre 2011, www.plan-batiment.legrenelle-environnement.fr
- [PBG_EnR, 2010] Propositions pour développer les énergies renouvelables appliquées au bâtiment - Rapport du groupe de travail "énergies renouvelables", Novembre 2010.

- [PBG_I&R, 2011] Leviers à l'innovation dans le secteur du bâtiment - Rapport intermédiaire du groupe de travail "innovation & recherche", Janvier 2011.
- [PBG_RA, 2011] Plan Bâtiment Grenelle : rapport d'activité 2010, Février 2011, www.plan-batiment.legrenelle-environnement.fr
- [PCET, 2007] Plan Climat Énergie Territoriaux - Centre de Ressources, ADEME 2007, www.pcet-ademe.fr
- [PHI, 2011] Passivhaus Institut, Critères de certification pour les maisons passives en tant que bâtiment d'habitation, 17 mars 2011, www.passiv.de
- [Plan_Climat, 2010] Plan Climat de la France 2004-2012 : mise en œuvre du Grenelle Environnement, Mars 2010, www.developpement-durable.gouv.fr/Plan-climat-de-la-France
- [Plan_Particules, 2010] Plan particules : des mesures nationales et locales pour améliorer la qualité de l'air, Grenelle Environnement, DGEC, Juillet 2010.
- [PNACC, 2011-2015] PNACC, Plan National d'Adaptation aux effets du Changement Climatique 2011-2015, 20 juillet 2011.
- [PNBE, 2000-2006] Programme National Bois Énergie 2000-2006 - Rapport d'activités, ADEME, Février 2008, 160p.
- [PNBE, 2007-2010] Programme National Biomasse Énergie 2007-2010, Plaquette d'information, ADEME, Novembre 2007, 3p.
- [PNSE, 2009-2013] PNSE, Plan National Santé Environnement 2009-2013 : Des actions concrètes pour la prévention des risques sanitaires liés à l'environnement, Septembre 2009.
- [Poujoulat, 2011] L'innovation est dans l'air - Confort Plus : solutions innovantes de distribution d'air chaud, Poujoulat, Catalogue produits 2011, www.poujoulat.fr/airchaud/index.html
- [Prasad, 1987] R.C. Prasad, Analytical solution for a double-pipe heat exchanger with non-adiabatic condition at the outer surface, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 14 (6) (1987) 665-672.
- [Prasad, 1988] R.C. Prasad, Generalized solution and effectiveness for concentric tube heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 31 (12) (1988) 2571-2578.
- [PREBAT, 2006] ADEME, CSTB, PUCA, Systèmes compacts ventilation chauffage eau chaude en Allemagne, Autriche et Suisse - Rapport intermédiaire, E. Fleury, O. Catarina, A. Tissot, Décembre 2006, <http://www.prebat.net>
- [Prioriterre, 2011] Référentiel du label Bâtiment Basse Consommation Prioriterre, 5 janvier 2011, www.prioriterre.org
- [Prix_NRJ, 2011] Prix mensuels des énergies en 2011 : usage domestique, Ministère Développement Durable, Service de l'Observation et des Statistiques (SOEs), Septembre 2011.
- [PUCA, 2009] Quels systèmes de chauffage et de climatisation pour les bâtiments neufs et réhabilités de demain ? Le journal d'information du PUCA, Séminaire PREBAT du 3 juin 2009.
- [Puech, 2009] Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois, Rapport Puech, 6 avril 2009.
- [QUALITEL, 2008] Référentiel d'évaluation de la certification Habitat & Environnement, 1er janvier 2008, www.cerqual.fr
- [Rabinovich, 1961] G.D. Rabinovich, Steady state heat transfer among three streams in a parallel flow recuperator (in Russian), *Inzh.-Fiz. Zh* 4 (11) (1961) 37-43.
- [Ribéron, 1996] J. Ribéron, Les différents systèmes de ventilation et l'influence de la perméabilité du bâtiment, formation professionnelle continue, ventilation des bâtiments, CSTB, Paris, France, 1996.
- [Ribéron, 2009] J. Ribéron, S. Kirchner, J.P. Lucas et O. Ramalho, État de la ventilation dans le parc de logements français, OQAI, CSTB Division Santé, Pôle Expologie des Environnements Intérieurs, Paris, France, Juin 2009.
- [Roth, 2010] Roth, Les planchers chauffants rafraîchissants, Comparatif des différents émetteurs de chaleur, Catalogue 2010, www.roth-france.fr
- [Roulet, 2008] C.A. Roulet, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, Science & Ingénierie de l'Environnement, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (2008) 362p.

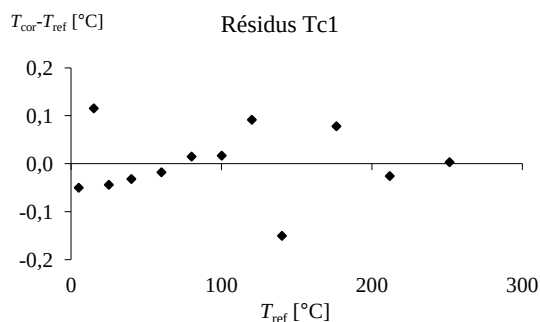
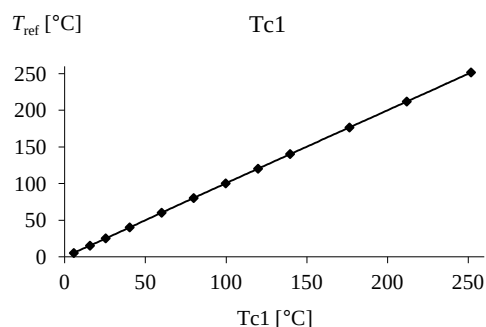
- [RT-bâtiment, 2012] RT-bâtiment, Ensemble des dispositifs pour améliorer la performance énergétique des bâtiments - La Réglementation Thermique, 2012, CSTB, ADEME, Grenelle Environnement, www.rt-batiment.fr
- [Russell, 2005] M. Russell, M. Sherman et A. Rudd, Review of residential ventilation technologies, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL 57730, Berkeley, USA, 2005.
- [Sacadura, 1993] J.-F. Sacadura, Initiation aux transferts thermiques, CAST, INSA de Lyon, Tec & Doc ed, (1993) 445p.
- [Sekulic, 1994] D.P. Sekulic, A compact solution of the parallel flow three-fluid heat exchanger problem, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 37 (14) (1994) 2183-2187.
- [Sekulic, 1995a] D.P. Sekulic et I. Kmecko, Three-fluid heat exchanger effectiveness: revisited, NY, USA, American Society of Mechanical Engineers (1995a)
- [Sekulic, 1995b] D.P. Sekulic, R.K. Shah, P.H. James et T.F. I., Thermal design theory of three-fluid heat exchangers, in *Advances in Heat Transfer*, vol. 26, Elsevier (1995b) 219-328.
- [Shpil'rain, 1982] E.E. Shpil'rain et K.A. Yakimovich, Heat transfer between three media in triple countercurrent pipe flow, *Inzh.-Fiz. Zh* 43 (6) (1982) 1028-1033.
- [Shpil'rain, 1983] E.E. Shpil'rain et K.A. Yakimovich, Heat exchange between three streams in pipes of variable cross section, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 45 (2) (1983) 937-939.
- [Sidler, 2008] O. Sidler, Les grands enjeux de l'énergie au XXIème siècle, <http://www.enertech.fr>
- [SNDD, 2010-2013] Stratégie Nationale de Développement Durable 2010-2013 : vers une économie verte et équitable, www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Presentation_SNDD.pdf
- [SOeS, 2011] Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), Bilan énergétique de la France pour 2010, 4 juillet 2011, www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr
- [SolarWall, 2010] SolarDuct PV/T - Système modulaire solaire de chauffage d'air et de production d'électricité, SolarWall, Conserval Engineering Inc. 2010, www.solarwall.fr
- [Sorlie, 1962] T. Sorlie, Three fluid heat exchanger design theory: counter and parallel flow, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Technical Report 54,
- [TwinSolar, 2007] Chauffage et ventilation solaire : simple - autonome - efficace, Grammer Solar, Brochure 2007, www.grammer-solar.com
- [Ünal, 1998] A. Ünal, Theoretical analysis of triple concentric-tube heat exchangers Part 1: Mathematical modelling, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 25 (7) (1998) 949-958.
- [Ünal, 2001] A. Ünal, Theoretical analysis of triple concentric-tube heat exchangers Part 2: Case studies, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 28 (2) (2001) 243-256.
- [Ünal, 2003] A. Ünal, Effectiveness-NTU relations for triple concentric-tube heat exchangers, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 30 (2) (2003) 261-272.
- [VABAT, 2009] VABAT - Vecteur air et traitement des ambiances dans les bâtiments à très basse consommation énergétique : approche numérique, expérimentale et architecturale, Tâche 1 : Définition des systèmes, ALDES, LASH-ENTPE, LEPTIAB-ULR, Arbor & Sens, Décembre 2009.
- [Wolf, 1964] J. Wolf, General solution of the equations of parallelflow multichannel heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 7 (8) (1964) 901-919.
- [Xerfi_Bois, 2011] Le marché français des maisons en bois à l'horizon 2015 - Perspectives et mutations du marché - Paysage concurrentiel et stratégies de développement, Xerfi Research, Janvier 2011.
- [Zuritz, 1990] C.A. Zuritz, On the design of triple concentric-tube heat exchangers, *Journal of Food Process Engineering* 12 (2) (1990) 113-130.

Annexes

Annexe 1 : Exemples de résultats obtenus lors de l'étalonnage des capteurs de température.....	246
Annexe 2 : Calcul de l'incertitude sur les puissances transférées et sur l'efficacité de l'échange	247
Annexe 3 : Expression détaillée des coefficients du modèle mathématique	248
Annexe 4 : Feuilles de résultats des essais en laboratoire sur le système combiné avec le CETP-NI n°3	250
Annexe 5 : Feuille de résultats des essais en laboratoire sur le système combiné avec le CETP-NI n°4.....	251
Annexe 6 : Comparaison des résultats obtenus lors des expériences et avec le modèle pour le CETP-NI n°4...	252
Annexe 7 : Poster de communication sur le projet SICHABO	253
Annexe 8 : Enquête auprès des locataires de 2 logements à la Chapelle St-Laurent	254
Annexe 9 : Schéma d'implantation du réseau de ventilation dans les deux T5 étudiés sur site	256
Annexe 10 : Fiche récapitulative des caractéristiques des 11 logements de Fontaine le Comte	257
Annexe 11 : Revue de presse de l'inauguration des 11 logements de Fontaine le Comte	259

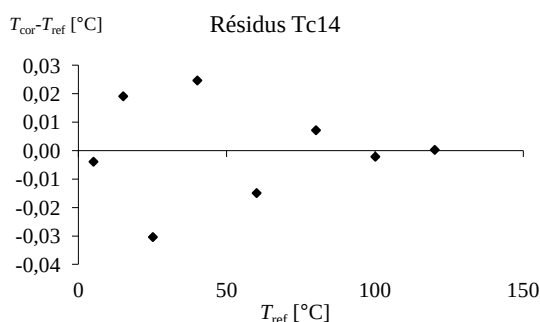
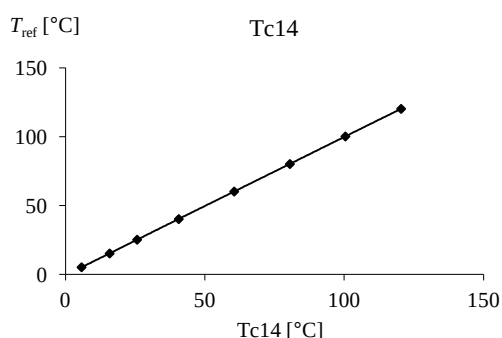
Annexe 1 : Exemples de résultats obtenus lors de l'étalonnage des capteurs de température

Un exemple est donné pour chacune des 3 catégories de capteurs à étalonner. Les graphiques de gauche donnent les points de mesure obtenus. Ces derniers sont reliés par une courbe de tendance de type polynomiale du 6^{ème} ordre. La loi associée à cette courbe est ensuite utilisée pour calculer la valeur de la température corrigée T_{cor} à partir de celle de la température de référence T_{ref} . Sur les graphiques de droite, la valeur maximale des résidus, c'est-à-dire de la différence $T_{cor} - T_{ref}$, donne la précision du capteur après la phase d'étalonnage, à condition qu'elle ne soit pas inférieure à celle du thermomètre de précision. Sinon, c'est cette dernière qui est conservée, soit dans notre cas $\pm 0,06^\circ\text{C}$.



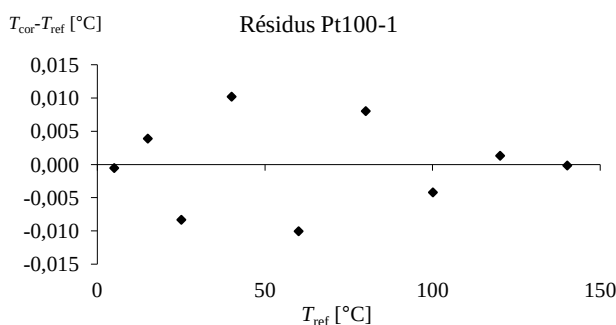
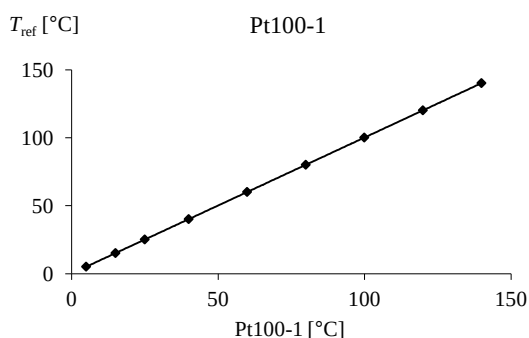
Loi de correction d'un thermocouple de type K travaillant sur les fumées, noté **Tc1** : $R^2 = 0,999999188939498$

$$y = -6,1805162660905 \cdot 10^{-13} x^6 + 4,56385566715304 \cdot 10^{-10} x^5 - 1,23026220819196 \cdot 10^{-7} x^4 + 1,47520880413837 \cdot 10^{-5} x^3 - 8,26766027018288 \cdot 10^{-4} x^2 + 1,03032712938765 x - 0,704347011379547$$



Loi de correction d'un thermocouple de type K travaillant sur l'air, noté **Tc14** : $R^2 = 0,99999816917595$

$$y = 1,09410309588262 \cdot 10^{-11} x^6 - 4,72724021337419 \cdot 10^{-9} x^5 + 7,87792825996928 \cdot 10^{-7} x^4 - 6,31808220231372 \cdot 10^{-5} x^3 + 2,45581862312096 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,964357917616354 x - 0,531460046593266$$



Loi de correction d'une sonde à résistance de platine, notée **Pt100-1** : $R^2 = 0,999999979780325$

$$y = -4,17743565673025 \cdot 10^{-13} x^6 + 1,10945233559952 \cdot 10^{-10} x^5 - 4,81636125273767 \cdot 10^{-9} x^4 - 8,98184565472786 \cdot 10^{-7} x^3 + 1,0218653911205 \cdot 10^{-4} x^2 + 9,9714001034603 \cdot 10^{-1} x + 0,185402311731527$$

Annexe 2 : Calcul de l'incertitude sur les puissances transférées et sur l'efficacité de l'échange

Incertitude sur la puissance thermique transférée par un fluide dans le CETP (ou le CEDP)

$$C_{\text{fluide}} = (\rho \ v \ S \ c_p)_{\text{fluide}}$$

$$\frac{\Delta C_{\text{fluide}}}{C_{\text{fluide}}} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta c_p}{c_p} \right)_{\text{fluide}}$$

$$\phi_{\text{fluide}} = C_{\text{fluide}} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})_{\text{fluide}}$$

$$\boxed{\frac{\Delta \phi_{\text{fluide}}}{\phi_{\text{fluide}}} = \left(\frac{\Delta C}{C} \right)_{\text{fluide}} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{\text{fluide}}}$$

Incertitude sur la puissance utile récupérée dans le CETP (ou le CEDP)

$$\phi_{\text{utile récupérée}} = \phi_{AV} = C_{AV} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})_{AV}$$

$$\frac{\Delta \phi_{\text{utile récupérée}}}{\phi_{\text{utile récupérée}}} = \frac{\Delta \phi_{AV}}{\phi_{AV}} = \left(\frac{\Delta C}{C} \right)_{AV} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{AV}$$

Incertitude sur la puissance maximum récupérable dans le CETP

$$\phi_{\text{max récupérable}} = (\rho \ v \ S \ c_p)_{FC} (T_{FC, \text{in}} - T_{AV, \text{in}}) + (\rho \ v \ S \ c_p)_{AC} (T_{AC, \text{in}} - T_{AV, \text{in}})$$

$$\frac{\Delta \phi_{\text{max récupérable}}}{\phi_{\text{max récupérable}}} = \left(\frac{\Delta C}{C} \right)_{FC} + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{FC} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{AV} + \left(\frac{\Delta C}{C} \right)_{AC} + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{AC}$$

Incertitude sur l'efficacité thermique de l'échange entre les fluides dans le CETP

$$E = \frac{\phi_{\text{utile récupérée}}}{\phi_{\text{max récupérable}}}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \phi_{\text{utile récupérée}}}{\phi_{\text{utile récupérée}}} + \frac{\Delta \phi_{\text{max récupérable}}}{\phi_{\text{max récupérable}}}$$

$$\boxed{\frac{\Delta E}{E} = \left(\frac{\Delta C}{C} \right)_{AV} + \left(\frac{\Delta C}{C} \right)_{FC} + \left(\frac{\Delta C}{C} \right)_{AC} + 4 \cdot \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{AV} + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{FC} + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{AC}}$$

Annexe 3 : Expression détaillée des coefficients du modèle mathématique

Les coefficients α_n , β_n et γ_n sont donnés par les équations (2.68) à (2.70) :

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \alpha_n = F_n'' \theta_1(0) + K_n'' \quad \beta_n = F_n' \theta_1(0) + K_n' \quad \gamma_n = F_n \theta_1(0) + K_n$$

où F_n , F_n' , F_n'' , K_n , K_n' et K_n'' , pour $n = 1, 2$ et 3 , sont des coefficients qui s'écrivent en fonction des paramètres connus N_0 , N_1 , N_3 , C_{r1} , C_{r3} , λ_1 , λ_2 , λ_3 , $\theta_1(1)$, $\theta_2(0)$ et $\theta_3(0)$.

$$\boxed{n=1}$$

$$\alpha_1 = F_1'' \theta_1(0) + K_1'' \quad K_1'' = G_1'' \theta_2(0) + H_1'' \theta_1(1) \quad F_1'' = 1 - (F_1' + F_1)$$

$$\beta_1 = F_1' \theta_1(0) + K_1' \quad K_1' = G_1' \theta_2(0) + H_1' \theta_1(1) \quad G_1'' = -(G_1' + G_1)$$

$$\gamma_1 = F_1 \theta_1(0) + K_1 \quad K_1 = G_1 \theta_2(0) + H_1 \theta_1(1) \quad H_1'' = -(H_1' + H_1)$$

$$F_1' = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[(N_1 - \lambda_1) - F_1 (\lambda_3 - \lambda_1) \right] \quad F_1 = -F \left[(\lambda_2 - \lambda_1) e^{\lambda_1} + (e^{\lambda_2} - e^{\lambda_1}) (N_1 - \lambda_1) \right]$$

$$G_1' = \frac{-1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[N_1 + G_1 (\lambda_3 - \lambda_1) \right] \quad G_1 = F (e^{\lambda_2} - e^{\lambda_1}) N_1 \quad H_1 = F (\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$H_1' = \frac{-1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[H_1 (\lambda_3 - \lambda_1) \right] \quad F = \left[(\lambda_2 - \lambda_1) (e^{\lambda_3} - e^{\lambda_1}) - (\lambda_3 - \lambda_1) (e^{\lambda_2} - e^{\lambda_1}) \right]^{-1}$$

$$\boxed{n=2}$$

$$\alpha_2 = F_2'' \theta_1(0) + K_2'' \quad K_2'' = \theta_2(0) - (K_2' + K_2)$$

$$\beta_2 = F_2' \theta_1(0) + K_2' \quad K_2' = \frac{-1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[(N_1 C_{r1} + N_3 C_{r3} + \lambda_1) \theta_2(0) - N_3 C_{r3} \theta_3(0) + (\lambda_3 - \lambda_1) K_2 \right]$$

$$\gamma_2 = F_2 \theta_1(0) + K_2 \quad K_2 = -G \left[\frac{(N_1 C_{r1} + N_3 C_{r3} + \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{(N_3 - \lambda_1'')}{\lambda_2'' - \lambda_1''} \right] \theta_2(0) + G \left[\frac{N_3 C_{r3}}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{N_0 + N_3}{\lambda_2'' - \lambda_1''} \right] \theta_3(0)$$

$$F_2'' = -(F_2' + F_2) \quad F_2' = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[N_1 C_{r1} - F_2 (\lambda_3 - \lambda_1) \right]$$

$$F_2 = G \left[\frac{N_1 C_{r1}}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{K_0}{\lambda_2'' - \lambda_1''} \right] \quad \text{avec : } F_1'' + F_1' + F_1 = 1$$

$$G = \left[\frac{\lambda_3 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{\lambda_3'' - \lambda_1''}{\lambda_2'' - \lambda_1''} \right]^{-1}$$

$$\boxed{n=3}$$

$$\alpha_3 = F_3'' \theta_1(0) + K_3'' \quad K_3'' = G_3'' \theta_2(0) + H_3'' \theta_1(1) \quad F_3'' = 1 - (F_3' + F_3)$$

$$\beta_3 = F_3' \theta_1(0) + K_3' \quad K_3' = G_3' \theta_2(0) + H_3' \theta_1(1) \quad G_3'' = -(G_3' + G_3)$$

$$\gamma_3 = F_3 \theta_1(0) + K_3 \quad K_3 = G_3 \theta_2(0) + H_3 \theta_1(1) \quad H_3'' = -(H_3' + H_3)$$

$$F_3' = \frac{-1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[(N_0 + N_3 + \lambda_1) + F_3 (\lambda_3 - \lambda_1) \right] \quad F_3 = H \left[(\lambda_2 - \lambda_1) (N_3^2 C_{r3} - \lambda_1 \lambda_1') + (\lambda_2 \lambda_2' - \lambda_1 \lambda_1') (N_0 + N_3 + \lambda_1) \right]$$

$$G_3' = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[N_3 - G_3 (\lambda_3 - \lambda_1) \right] \quad G_3 = -H N_3 \left[(\lambda_2 \lambda_2' - \lambda_1 \lambda_1') + (N_1 C_{r1} + N_3 C_{r3}) (\lambda_2 - \lambda_1) \right]$$

$$H_3' = \frac{-1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[H_3 (\lambda_3 - \lambda_1) \right] \quad H_3 = H (\lambda_2 - \lambda_1) N_3 N_1 C_{r1}$$

$$H = \left[(\lambda_3 \lambda_3' - \lambda_1 \lambda_1') (\lambda_2 - \lambda_1) - (\lambda_3 - \lambda_1) (\lambda_2 \lambda_2' - \lambda_1 \lambda_1') \right]^{-1}$$

Comme présenté dans les équations (2.54) et (2.71), les solutions générales du système linéaire homogène de 3 équations différentielles ordinaires du 3^{ème} ordre s'écrivent sous la forme d'une somme de fonctions exponentielles en X :

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \theta_n(X) = \alpha_n e^{\lambda_1 X} + \beta_n e^{\lambda_2 X} + \gamma_n e^{\lambda_3 X}$$

$$\forall n \in \{1, 2, 3\} \quad \theta_n(X) = \left[F_n'' e^{\lambda_1 X} + F_n' e^{\lambda_2 X} + F_n e^{\lambda_3 X} \right] \theta_1(0) + \left[K_n'' e^{\lambda_1 X} + K_n' e^{\lambda_2 X} + K_n e^{\lambda_3 X} \right]$$

avec :

$$\theta_1(0) = \frac{\xi_4 (1 - e^{\lambda_1}) + \xi_5 (1 - e^{\lambda_2}) + \xi_6 (1 - e^{\lambda_3}) + \theta_1(1)}{1 + \xi_1 (e^{\lambda_1} - 1) + \xi_2 (e^{\lambda_2} - 1) + \xi_3 (e^{\lambda_3} - 1)}$$

où $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$ et ξ_6 sont des coefficients qui peuvent s'écrire en fonction des paramètres connus

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, N_1, F_n, F_n', F_n'', K_n, K_n'$ et K_n'' pour $n = 1$ et 2.

$$\xi_1 = \frac{N_1}{\lambda_1} (F_1'' - F_2'')$$

$$\xi_2 = \frac{N_1}{\lambda_2} (F_1' - F_2')$$

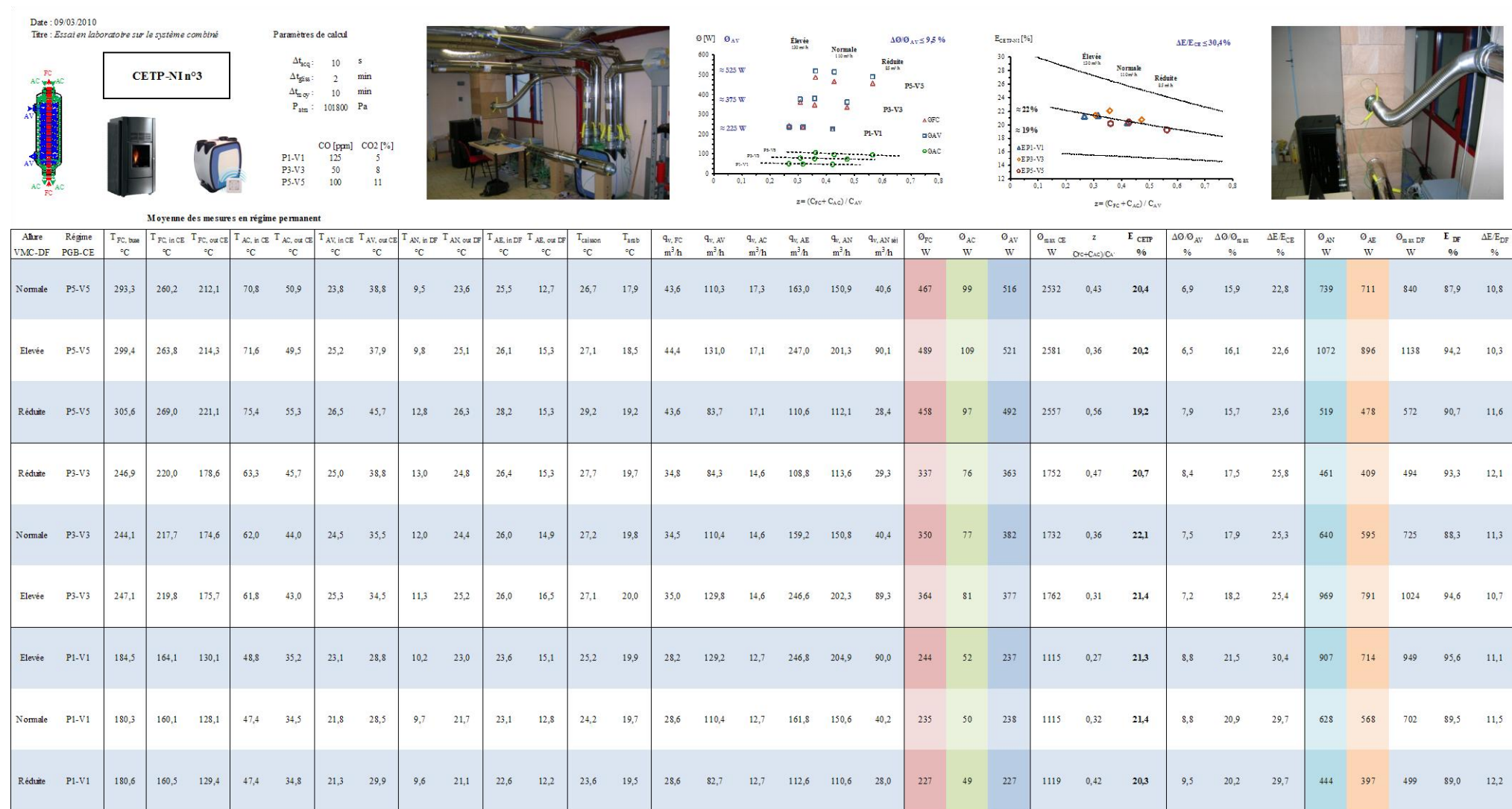
$$\xi_3 = \frac{N_1}{\lambda_3} (F_1 - F_2)$$

$$\xi_4 = \frac{N_1}{\lambda_1} (K_1'' - K_2'')$$

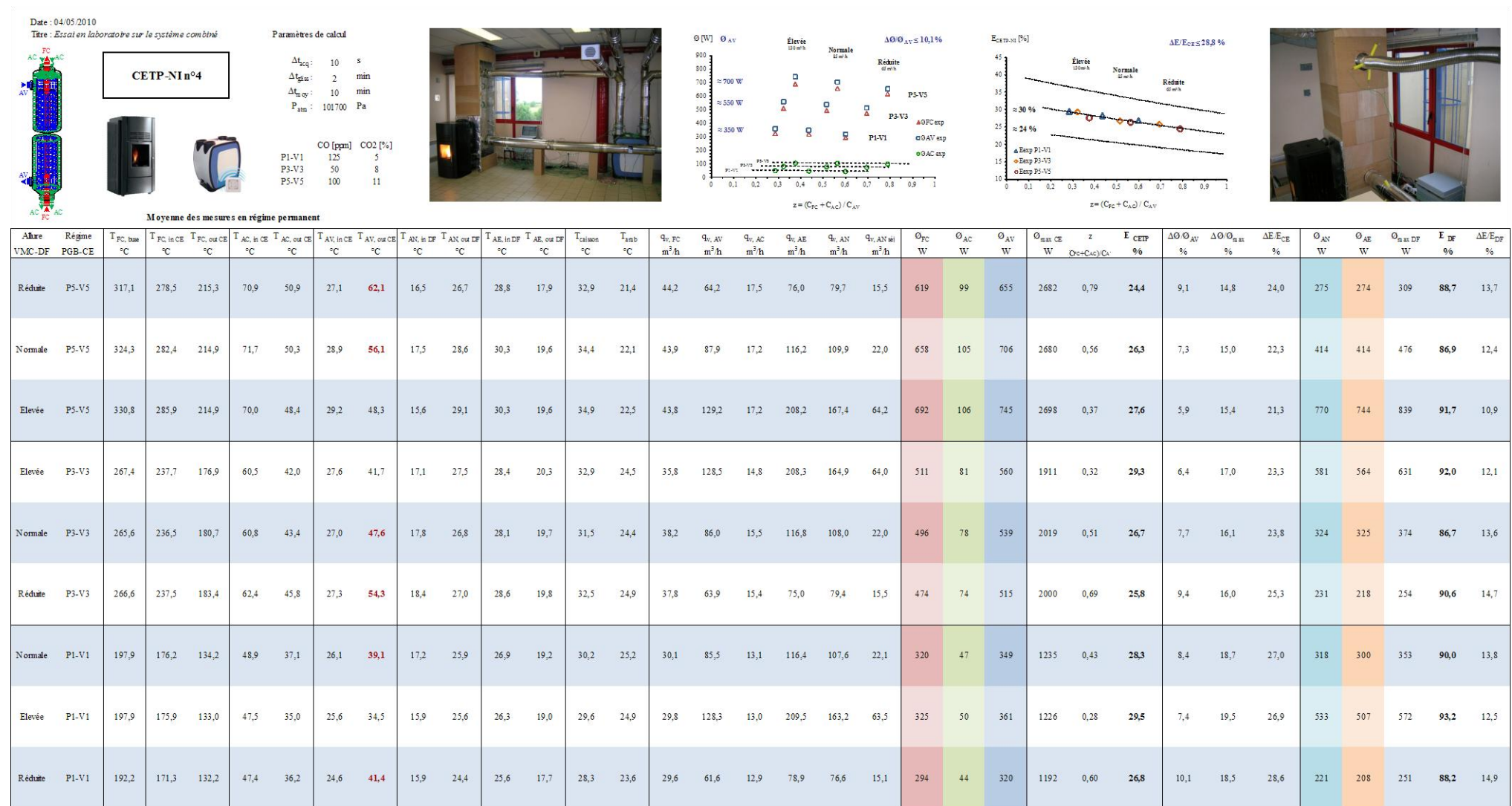
$$\xi_5 = \frac{N_1}{\lambda_2} (K_1' - K_2')$$

$$\xi_6 = \frac{N_1}{\lambda_3} (K_1 - K_2)$$

Annexe 4 : Feuilles de résultats des essais en laboratoire sur le système combiné avec le CETP-NI n°3



Annexe 5 : Feuille de résultats des essais en laboratoire sur le système combiné avec le CETP-NI n°4



Annexe 6 : Comparaison des résultats obtenus lors des expériences et avec le modèle pour le CETP-NI n°4

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	11	Puissance	1	$q_{v,avTOT}$ [m³/h]	76,6	T ₀ [°C]	28,3
Itérations	3	Ventilateur	1	$q_{v,avCF}$ [m³/h]	61,6	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		8		19		4	
UA [W/K]		2,50		2,83		2,15	
T _{in} [°C]		171,3		24,6		47,4	
Sorties		F		AV		AC	
		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T _{out} [°C]		132,1	132,2	41,1	41,4	36,3	36,2
ΔT _[in-out] [°C]		39,3	39,1	16,5	16,8	11,1	11,1
Ø [W]		295	294	314	320	44	44
Écart mod/exp		0,4%		1,7%		0,1%	
Efficacité		Ø _{max} [W]		E _{mod} [%]		Ø _{exp} mod [W] Ø _{exp} exp [W]	
E = Q _{av} / Ø _{max}		1192		26,4		26,8	
		z [-]		0.60		25 18	

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	6,85	Puissance	3	q _{v,av TOT} [m³/h]	79,4	T ₀ [°C]	32,5
Itérations	4	Ventilateur	3	q _{v,av CF} [m³/h]	63,9	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		9		19		4	
UA [W/K]		2,85		3,08		2,36	
T _{in} [°C]		237,5		27,3		62,4	
Sorties		F		AV		AC	
		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T _{out} [°C]		182,8	183,4	54,0	54,3	45,7	45,8
ΔT _{in-out} [°C]		54,7	54,1	26,8	27,0	16,7	16,6
Ø [W]		480	474	511	515	74	74
Écart mod/exp		1,1%		0,9%		0,4%	
Efficacité		Q _{max} [W]		E _{mod} [%]		Q _{out exp} [W]	
E = Q _{av} / Q _{max}		2000		25,5		25,8	
		0.69				44	
						34	

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	3,05	Puissance	5	$q_{v,avTOT}$ [m³/h]	193,4	T ₀ [°C]	34,9
Itérations	4	Ventilateur	5	$q_{v,avCF}$ [m³/h]	129,2	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		10		39		5	
UA [W/K]		3,27		3,49		2,40	
T _{in} [°C]		285,9		29,2		70,0	
Sorties		F		AV		AC	
		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T _{out} [°C]		215,3	214,9	48,3	48,3	47,8	48,4
ΔT _[in-out] [°C]		70,6	71,0	19,1	19,1	22,2	21,6
Φ [W]		687	692	746	745	109	106
Écart mod/exp		0,6%		0,1%		2,8%	
Efficacité		Φ _{max} [W]		E _{mod} [%]		Φ _{out mod} [W]	
E = Φ _{av} / Φ _{max}		2698		E _{exp} [%]		Φ _{out exp} [W]	
		z [-]		27,7		50	
		0,37		27,6		52	

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	9,05	Puissance	1	$q_{v,avTOT}$ [m³/h]	191,8	T ₀ [°C]	29,6
Itérations	3	Ventilateur	1	$q_{v,avCF}$ [m³/h]	128,3	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		8		41		4	
UA [W/K]		2,67		3,14		2,09	
T _{in} [°C]		175,9		25,6		47,5	
		F		AV		AC	
Sorties		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T _{out} [°C]		132,4	133,0	34,4	34,5	35,0	35,0
ΔT _[in-out] [°C]		43,5	42,9	8,9	8,9	12,5	12,5
Ø [W]		329	325	359	361	50	50
Écart mod/exp		1,3%		0,6%		0,0%	
Efficacité		Ø _{max} [W]		E _{mod} [%]		E _{exp} [%]	
E = Ø _{av} / Ø _{max}		1226		29,3		29,5	
		z [-]		0,28		20	
						14	

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	6,3	Puissance	3	$q_{v,avTOT}$ [m³/h]	108,0	T_0 [°C]	31,5
Itérations	4	Ventilateur	3	$q_{v,avCF}$ [m³/h]	86,0	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		9		26		5	
UA [W/K]		2,94		3,18		2,32	
T_{in} [°C]		236,5		27,0		60,8	
Sorties		F		AV		AC	
		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T_{out} [°C]		180,3	180,7	47,6	47,6	43,4	43,4
ΔT_{in-out} [°C]		56,2	55,8	20,6	20,7	17,4	17,3
Φ [W]		500	496	538	539	79	78
Écart mod/exp		0,7%		0,3%		0,4%	
Efficacité		Φ_{max} [W]		E_{mod} [%]		E_{exp} [%]	
$E = \Phi_{av} / \Phi_{max}$		2019		26,6		26,7	
		z [-]		0,51		41	
						35	

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	2,68	Puissance	5	$q_{v,avTOT}$ [m³/h]	109,9	T ₀ [°C]	34,4
Itérations	4	Ventilateur	5	$q_{v,avCF}$ [m³/h]	87,9	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		10		26		5	
UA [W/K]		3,17		3,36		2,45	
T _{in} [°C]		282,4		28,9		71,7	
Sorties		F		AV		AC	
		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T _{out} [°C]		215,5	214,9	55,9	56,1	50,1	50,3
ΔT _[in-out] [°C]		66,8	67,5	27,0	27,2	21,7	21,4
Φ [W]		652	658	701	706	106	105
Écart mod/exp		1,0%		0,7%		1,0%	
Efficacité		Φ _{max} [W]		E _{mod} [%]		E _{exp} [%]	
E = Φ _{av} / Φ _{max}		2680		26,2		26,3	
		z [-]		0,56		56	
						57	

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	8,65	Puissance	1	$q_{v,avTOT}$ [m³/h]	107,6	T ₀ [°C]	30,2
Itérations	3	Ventilateur	1	$q_{v,avCF}$ [m³/h]	85,5	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		8		27		4	
UA [W/K]		2,60		2,98		2,14	
T _{in} [°C]		176,2		26,1		48,9	
		F		AV		AC	
Sorties							
		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T _{out} [°C]		134,5	134,2	38,9	39,1	36,9	37,1
ΔT _[in-out] [°C]		41,6	41,9	12,8	13,1	12,1	11,8
Ø [W]		317	320	342	349	48	47
Écart mod/exp		0,7%		1,9%		1,8%	
Efficacité							
E = Q _v / Q _{max}		Q _{max} [W]	1235	E _{mod} [%]	E _{exp} [%]	Ø _{out mod} [W]	Ø _{out exp} [W]
		z [-]	0.43	27.7	28.3	23	18

Point		Régime Poêle		Allure VMC-DF		Caractéristiques	
temporel	4,55	Puissance	3	$q_{v,avTOT}$ [m³/h]	192,6	T ₀ [°C]	32,9
Itérations	4	Ventilateur	3	$q_{v,avCF}$ [m³/h]	128,5	Nb ailettes	8
Entrées		F		AV		AC	
L [mm]		1650		1650		1650	
D [mm]		80		180		230	
C [W/K]		8		40		4	
UA [W/K]		2,92		3,31		2,26	
T _{in} [°C]		237,7		27,6		60,5	
Sorties		F		AV		AC	
		mod	exp	mod	exp	mod	exp
T _{out} [°C]		177,9	176,9	41,4	41,7	41,8	42,0
ΔT _{in-out} [°C]		59,8	60,8	13,8	14,1	18,7	18,5
Ø [W]		503	511	549	560	81	81
Écart mod/exp		1,6%		1,9%		0,8%	
Efficacité							
E = Q _{us} / Q _{max}		Q _{max} [W]	1911	E _{mod} [%]	E _{exp} [%]	Q _{out} mod [W]	Q _{out} exp [W]
		z [-]	0.32	28.7	29.3	35	32

Annexe 7 : Poster de communication sur le projet SICHABO

Excellence Environnementale & Développement des Éco-Industries

 **SICHABO** 

**Développement d'un système intégré
de ventilation et de chauffage au bois
dans les bâtiments à basse consommation**

**VMC double flux
à haut rendement**

**Conduit échangeur
à triple paroi**

**Poêle à granulés
à combustion étanche**

3 industriels - 2 laboratoires - 1 bailleur social

Croissance Verte

Annexe 8 : Enquête auprès des locataires de 2 logements à la Chapelle St-Laurent

➤ Principales observations

Généralités : Les deux habitations mitoyennes à étage possèdent une bonne compacité et un aspect général simple et contemporain. Les grands principes de l'architecture bioclimatique sont respectés avec une façade au sud lumineuse et ouverte sur l'extérieur grâce à trois grandes baies vitrées protégées par des débords de toiture et une façade nord avec seulement deux ou trois petites ouvertures. Des panneaux solaires thermiques sont intégrés en toiture, côté sud.



Façade sud : T3 à gauche et T4 à droite



Façade nord : T4 à gauche et T3 à droite

L'ambiance globale est saine et confortable dans les deux habitations. La construction est soignée et la mixité des matériaux (bois, brique, terre crue) appréciable. Les volumes sont simples et les différentes pièces bien agencées. Le garage est un atout indéniable (buanderie, rangement, stockage granulés...), même s'il ne fait pas partie du volume chauffé.

Poêle à granulés : Au rez-de-chaussée, la vie s'organise autour du poêle à granulés, véritable cœur thermique de l'habitation. L'air chaud gagne ensuite les chambres par convection naturelle via la cage d'escalier. La chambre la plus éloignée est cependant toujours plus froide que les autres. Le poêle à granulés est véritablement plébiscité par les occupants. Ils ont appris à maîtriser ce système de chauffage (programmation, gestion des alarmes, alimentation en granulés, entretien...) jugé très économique, même sans matériel ni formation spécifique. Dans les deux familles, l'aspirateur classique n'a pas tenu le coup. La vitre des poêles est souvent fortement noircie, ce qui rend les flammes à peine visibles. Avec de très jeunes enfants, les occupants ont ressenti la nécessité d'installer un "parc" devant le poêle pour éviter tout risque de brûlure.

VMC double flux : La VMC-DF apparaît clairement comme la principale source d'inconfort, le point noir de l'habitation, principalement à cause du bruit qu'elle engendre au niveau des bouches de soufflage. Cet appareil reste assez complexe pour les habitants et ce sentiment s'est renforcé au fur et à mesure des pannes et des interventions stériles des professionnels sur ce matériel. Les habitants ne voient pas alors d'autres alternatives que de réduire au minimum l'allure de la VMC-DF en journée et vont même jusqu'à la couper électriquement pendant la nuit pour éviter ces nuisances sonores.

Il faut préciser que le bruit n'a lieu qu'au niveau des bouches de soufflage, c'est-à-dire dans les différentes pièces de vie (séjour et chambres). Les habitants ont également remarqué que le bruit et en particulier le sifflement, pouvait être réduit en enlevant les grilles des bouches de soufflage. Avec le nouveau modèle de VMC-DF mis en place, ces grilles ont été remplacées mais le bruit au soufflage reste encore trop important pour que les habitants respectent les allures de fonctionnement préconisées.

➤ Principales recommandations

Généralités : Il serait intéressant de connaître précisément le poids des différents postes de consommation d'électricité. Pour les habitants, le rôle de la VMC-DF et des panneaux solaires thermiques n'est pas aussi clair que celui du poêle à granulés. Un guide simplifié d'utilisation des systèmes pourrait être rédigé pour faciliter l'appropriation des différents appareils par les habitants.

Poêle à granulés : L'utilisation d'un matériel adapté pour assurer l'entretien du poêle à granulés et le nettoyage quotidien du brasero et de la vitre pourraient être davantage pris en compte par le bailleur. À ce titre, un aspirateur à cendres, un grattoir pour le brasero, une coupelle pour le versement des granulés dans la trémie et un produit nettoyant pour la vitre devraient accompagner la mise en place d'un tel appareil de chauffage, surtout s'il s'agit du chauffage principal de l'habitation. On peut également s'attendre de la part des locataires qui ont de très jeunes enfants, à une demande de protection supplémentaire autour du poêle à granulés pour éviter tout risque de brûlure ; l'installation d'un « parc » autour de l'appareil peut alors être conseillée voire prévue.

VMC double flux : Le dispositif de réglage des allures de la VMC DF aurait pu être placé sur le mur du côté de la cuisine, plutôt que dans le garage. Le problème des nuisances sonores causées par la VMC DF pourrait être résolu, car la source du sifflement perceptible au niveau des bouches de soufflage provient de l'impact sur la grille de diffusion du jet d'air qui est créé à la sortie du régulateur de débit. En effet, un régulateur de débit est présent en amont de chaque bouche de soufflage, mais il est placé beaucoup trop près de la grille. Une solution pour réduire le bruit au soufflage consiste alors à éloigner les régulateurs de débit d'au moins 50 cm par rapport aux bouches de soufflage. Cette opération n'est pas très complexe, même si le fait que les bouches de soufflage soient placées immédiatement après un élément de gaine rigide en forme de « coude » ne facilite pas le recul du régulateur de débit. Ce point mérite une attention particulière lors de l'installation.

Sécurité : Le Parlement a adopté le jeudi 25 février 2010 la loi rendant obligatoire l'installation de détecteurs avertisseurs de fumées normalisés (DAAF) dans tous les lieux d'habitation. La mise en place de ces appareils devant respecter la norme NF EN 14604 et posséder le marquage CE dans ce type de logement est conseillée.



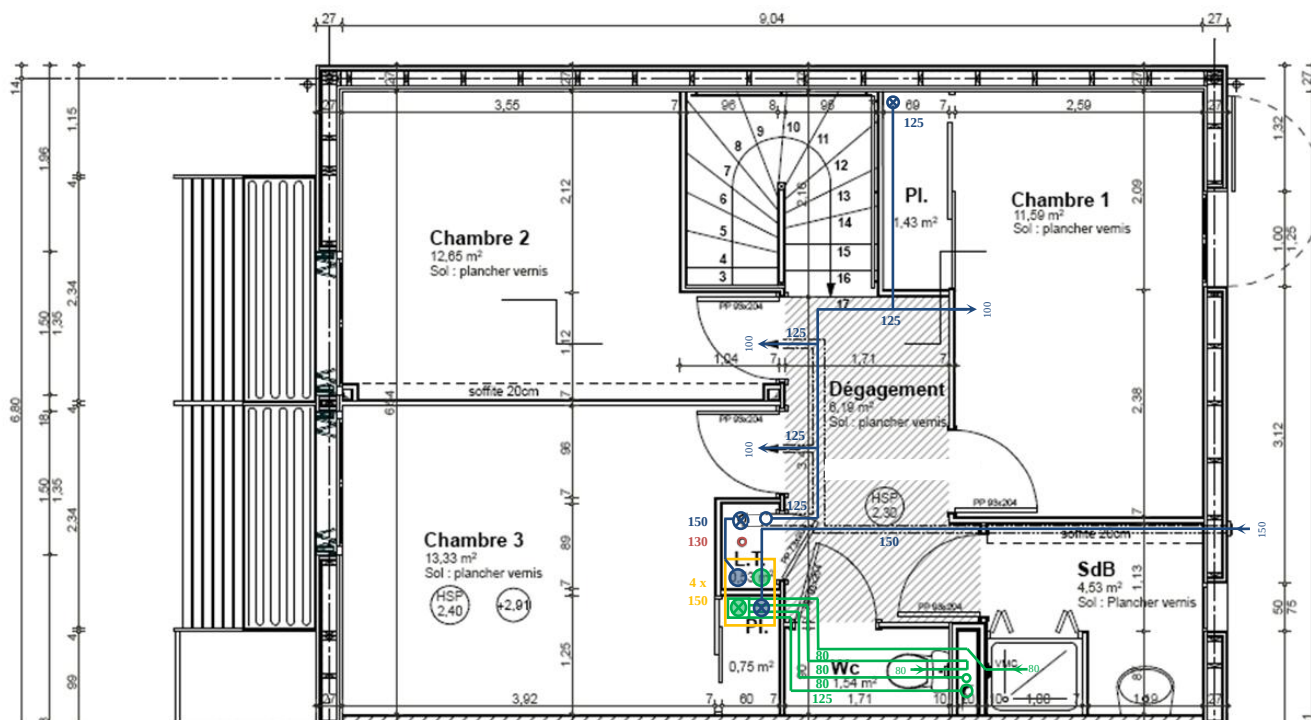
Poêle à granulés de bois 6 kW
adossé à un mur de briques d'argile



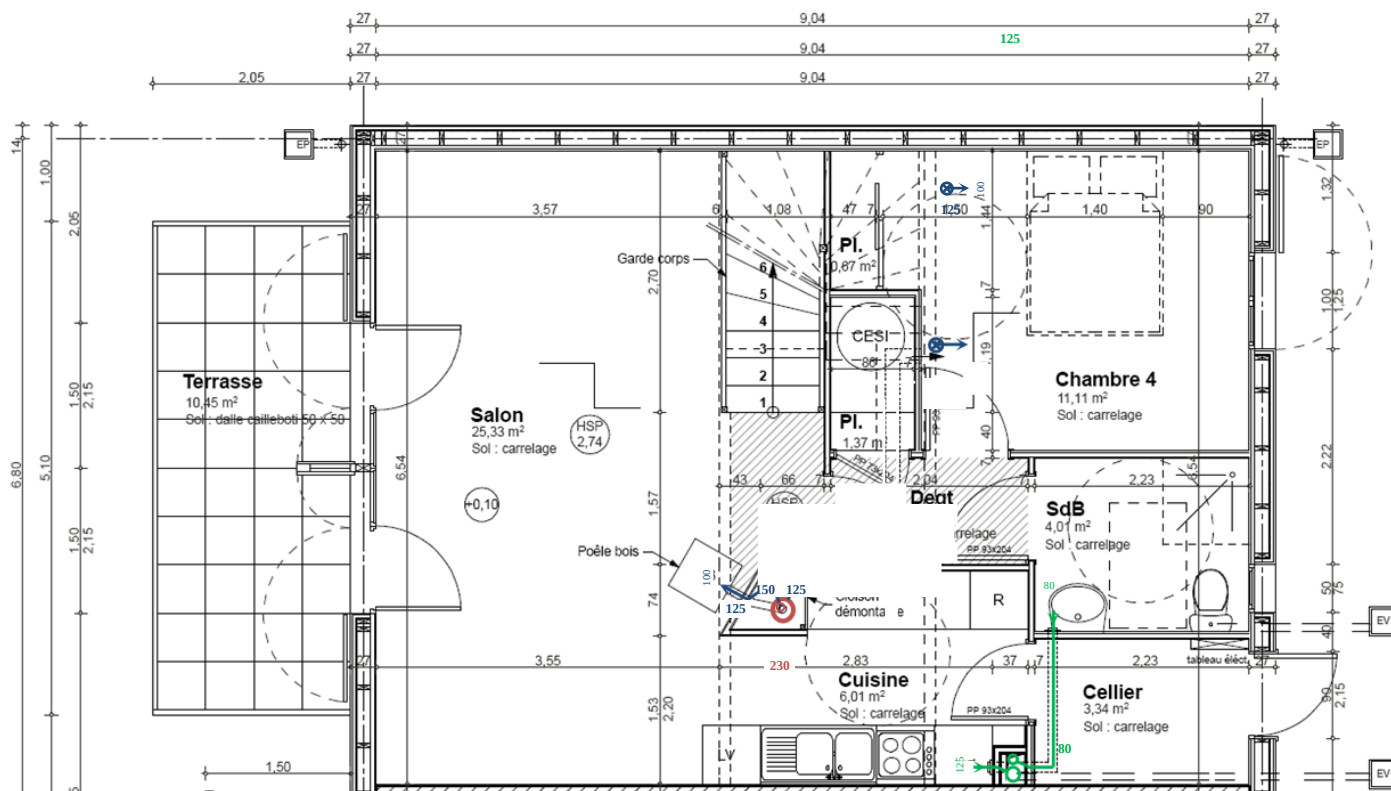
VMC double flux à haut rendement
Cocoon... remplacée au bout d'1 an !

Annexe 9 : Schéma d'implantation du réseau de ventilation dans les deux T5 étudiés sur site

ETAGE



REZ-DE-CHAUSSÉE



Annexe 10 : Fiche récapitulative des caractéristiques des 11 logements de Fontaine le Comte

Résidence Guy de Maupassant

Fontaine-Le-Comte (86)

OPERATION DE DEMONSTRATION

Logements intermédiaires - social / construction



Surface hors d'œuvre nette (SHON) en m² : 976,89

Surface habitable (SHAB) en m² : 809,42

Logements : opération de 11 logements de type habitat intermédiaire, répartis en 3 îlots :
2 îlots de 4 logements (2 T5, 2 T2) et un îlot de 3 logements (1 T5, 2 T2) construits en R+1

Opération réalisée par SIPEA Habitat. L'ambition du Maître d'ouvrage a été de reprendre un projet en échec (Projet initial établi sur la base de 11 maisons individuelles) avec les mêmes acteurs en instaurant une nouvelle démarche de conception dite "démarche accompagnée" avec l'appui du Cluster Eco-habitat. Cette méthode beaucoup plus participative et transversale a abouti à une double performance :

- Energétique : initialement THPE, les bâtiments ont obtenu le label BBC
- Economique : baisse du coût de construction de 1500 à 1100 € HT/m² SU.

Les choix opérés par l'équipe projet (Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre) ont permis d'atteindre le niveau BBC visé : compacité, orientation, isolation, inertie, chauffage bois et installation solaire thermique.

- opération porteuse d'innovations avec une double expérimentation :

→ le couplage d'un poêle à granulés avec une VMC double flux pour répartir la chaleur dans le logement. Projet de recherche nommé "vecteur air-bois", initié par le Cluster Eco-habitat, en partenariat avec le LEPTIAB et 3 industriels régionaux : POUJOULAT, VIM, SILENE

→ 7 types de toitures terrasses (végétalisées, peinture froide cool roof, gravillons, autoprotégées...) instrumentées pour étudier leur influence sur les comportements thermiques des bâtiments. Partenariat mis en place avec le LEPTIAB, L'INRA, SIPEA et l'entreprise SOPREMA.

- Maîtrise de l'étanchéité à l'air des bâtiments : réalisation d'un "cahier de prescriptions techniques", d'échantillonnage, plusieurs tests d'étanchéité sur le chantier (blower door).

- Sensibilisation des usagers : livret d'accueil spécifique, journée portes ouvertes, charte du bon usage, suivi des consommations.

www.cluster-ecohabitat.fr


Appel à projets "1 000 maisons bois" de la Région Poitou-Charentes



Localisation

Fontaine-Le-Comte (86)

Zone climatique : H2b

Altitude : < 400 m

Performance énergétique

Label obtenu	BBC Effinergie
Niveau label BBC-Effinergie	50 kWh/m² an
Niveau énergétique du projet*	37 kWh/m² an

* Pour les 5 usages de la RT 2005

Performances réglementaires

Ubât (en W/m².an)		
Projet	U bât ref	Gain
0,385	0,686	43,88%

Cep projet (en kWh/m².an)

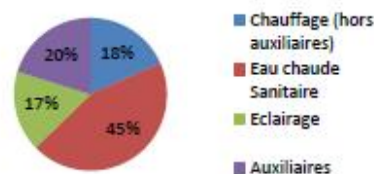
Projet	Références	Gain
44,85	151,77	70,45%

Ces valeurs sont calculées par rapport à la référence réglementaire (RT 2005)

Autres Labels

Certification Habitat & Environnement profil A

Décomposition de Cep Projet hors production photovoltaïque



Température intérieure conventionnelle / Tic (en C°)

Projet	Références	Gain
27	29	2



APD :
juin 2008
Début chantier :
mai 2009
Livraison :
juillet 2010

N° de fiche : 10-C1

Version du

08/11/2010

Résidence Guy de Maupassant

Système constructif

Structure / isolation	Structure maçonnerie avec enveloppe ossature bois et 20 cm d'isolation en ouate de cellulose	Coef Up =	0,171
Plancher	hourdis isolant sur vide sanitaire	Coef Up =	0,18
Toiture	Toitures-terrasses végétalisées; 30 cm d'isolant	Coef Up =	0,227
Fenêtres et porte-fenêtres	Menuiserie bois & Vitrages à isolation renforcée	Coef Uw =	1,7
Traitement des ponts thermiques	Enveloppe bois à l'extérieur de la maçonnerie		
Perméabilité à l'air	Coefficient de perméabilité I4 mesuré (m³/h.m²) : 0,6		

Equipement

Chauffage	Poêle à granulés bois Palazzetti Eco Fire 5kw (couplé par échangeur à une VMC double-flux sur 2 T5)
Emetteurs de chaleur	Association poêle/VMC double flux (échangeur Poujoulat)
Ventilation	VMC double flux UNELVENT AKOR HR sur les T5 et VMC hygro-B BAHIA micro WATT sur les T2
Eau chaude sanitaire	Installation solaire thermique CESI GEMINOX (FKC_1; SME 200, 300, 400)
Energies renouvelables	CESI / 4m² de surface de capteurs pour les T5 avec ballon de 400 l et 2m² pour les T2 avec ballon de 200l

Données économiques

	€ HT/m² de SU	€ HT/m² de SHAB	€ HT/m² de SHON
Coût bâtiment	1071	1147	951
Coût de construction*	1178	1261	1045
Coût Maîtrise d'œuvre	204	219	181

* coût construction : Bâtiment seul + VRD + aménagements extérieurs

Aides financières déclarées par le maître d'ouvrage :

Aide ou incitations financières	Crédit d'impôt (article 200 quater du code général des impôts)	Crédit d'impôt sur les intérêts d'emprunt	Prêt à taux zéro	Aide Région	Aide ADEME	Autres (département, collectivités locales, PREVAIR, FEDER)	Total connu (€ HT/m² de SHON)
Eligible	-	-	-	X	X	X	388
Montant (€ HT)				114 591 €	22 585 €	303 015 €	

Acteurs du projet

- MAÎTRE D'OUVRAGE
- ARCHITECTE
- BET fluides
- BET Structure
- Autre BET
- ECONOMISTE
- ENTREPRISES

- PARTENAIRE

SIPEA-HABITAT

HUMEAU-MONTAROU ASSOCIES

CLIMAT CONSEIL

LAMALLE INGENIERIE

ARCABOIS INGENIERIE (BET Bois)

EIC

Poitiers (86)

Poitiers (86)

Saint Benoit (86)

Châtelleraut (86)

Lencloître (86)

Buxerolles (86)



Une autre vision de l'habitat

BARREAU REGIS (VRD), LASSALLE (Terrassements/Gros oeuvre), MERLOT (Charpente bois/Ossature bois/bardage bois/Isolation), SOPREMA (Etanchéité), MENUISERIES MOREAU (Menuiseries extérieures), CPM DUBOIS (Cloisons/Isolation/Plafonds), M3C (Menuiseries intérieures bois), CHRISTIAN REMAUD (Carrelage/Faïence), IMMO DECO (Revetements de sols souples/Peinture), BEAUJANEAU (Electricité), GARNIER COUTANT (Chauffage/Production ECS/Ventilation/Plomberie/Sanitaires), SARL VIVEII (Espaces verts/Closures)

CLUSTER ECO-HABITAT

www.cluster-ecohabitat.fr

N° de fiche : 10-C1

Version du

08/11/2010

Annexe 11 : Revue de presse de l'inauguration des 11 logements de Fontaine le Comte

Centre Presse – le 15/10/2010

fontaine-le-comte

Onze logements sociaux sortent du bois

En plein cœur du lotissement des Grandes Chaumes, rue de Maupassant, ont fleuri onze logements sociaux en bois. Cette résidence expérimentale a été inaugurée mercredi.

Cette nouvelle résidence Guy de Maupassant comprend onze logements répartis sur trois bâtiments. Cinq T5 en duplex et six T2 superposés. Chaque logement dispose d'un jardin privatif ou d'une terrasse, et

d'un cellier extérieur permettant le stockage des granulés bois pour le chauffage. Tout ici est optimisé, avec une orientation sud privilégiée (72 % des surfaces vitrées), des capteurs solaires et une végétalisation du site. Un travail collégial entre les différents partenaires du projet, tous entrepreneurs locaux, a permis par ailleurs de réduire les coûts de production. « 20 % de moins par rap-

port au traditionnel », a souligné Jean-François Macaire vice-président du conseil régional.

Cette opération est porteuse d'une double expérimentation : un chauffage à granulés bois couplé à un double flux, et différents types de toitures végétalisées pour étudier leur influence sur les comportements thermiques des bâtiments. « C'est l'opération la plus aboutie qui rassemble toutes les ex-

périmentations faites par la Région », s'est félicité Jean-François Macaire également directeur de SIPEA.

Le maire, Philippe Brottier, a souligné l'aspect « sympathique » de ces logements et a rappelé que la commune souhaitait « impérativement faire du logement social ». D'autres programmes de ce type devraient voir le jour sur Fontaine-le-Comte. Toujours avec SIPEA.

repères

Audrey et Christelle, deux locataires ravis



Audrey et Christelle sont enthousiastes : « On est très bien ici (...) C'est avantageux sur tous les points. »

HEU-REU-SES ! Réunies dans le même enthousiasme, Audrey Quellier, 21 ans et étudiante, est arrivée avec son ami à la

mi-juillet et s'étonne encore de ne pas avoir chauffé son T2. « C'est vraiment appréciable. On est très bien ici. Et puis ici le quartier est calme ». Même enthousiasme du côté de Christelle Laroche, 33 ans, qui avec son conjoint et ses deux enfants a investi son nouveau lieu de vie depuis seulement 3 semaines. « C'est avantageux sur tous les points. »



Tous ont loué le caractère innovant de cette nouvelle résidence Guy-de-Maupassant.

Site de SIPEA habitat – le 14/10/2010

Résidence Guy de Maupassant : Des logements sociaux labélisés basse consommation

Publié le 14/10/2010

« Une réalisation exemplaire ! » C'est par ces mots que Jean-François Macaire, Président de SIPEA Habitat, a officiellement présenté la nouvelle opération portée par le bailleur social à Fontaine-Le-Comte : 11 logements sociaux labélisés Bâtiments Basse Consommation (BBC), aux lignes épurées et aux intérieurs cosy.

Une architecture moderne, une répartition des pièces judicieuse et de hautes performances énergétiques... le moins que l'on puisse dire, c'est que la résidence Guy de Maupassant à Fontaine-Le-Comte ne manque pas d'atouts. « Techniquement innovante, l'opération est également remarquable économiquement », remarque Jean-François Macaire, Président de SIPEA Habitat. Grâce à une méthode de « conception accompagnée » initiée par SIPEA Habitat avec la maîtrise d'œuvre et une quinzaine d'entreprises locales, les coûts de construction ont été largement optimisés. Mais ce programme est aussi la preuve qu'il est possible de proposer des logements sociaux de qualité, alliant confort et performance énergétique. »

Confort et performance

Réunis le 13 octobre dernier, les partenaires de l'opération ont pu découvrir les 5 T5 et 6 T2 répartis dans 3 bâtiments bardés de bois et recouverts d'une toiture végétalisée. L'occasion pour Guy Eyermaun, conseiller régional, Bernard Brétaudeau, Président du Cluster Eco-habitat et Philippe Brottier, Maire de Fontaine-Le-Comte de saluer à leur tour la réussite de l'opération. Équipé de panneaux solaires pour la production d'eau chaude, chaque logement dispose d'un jardin privatif ou d'une terrasse et d'un cellier extérieur pour stocker les granulés de bois destinés à alimenter le poêle pour le chauffage. Soucieuse de l'environnement, Corinne Alary vient tout juste d'emménager avec toute sa famille dans l'un des T5. Elle apprécie pleinement le confort proposé. « Le logement est spacieux et son niveau de performance énergétique me permettra de réaliser des économies substantielles, c'est parfait », se réjouit la nouvelle locataire.

Support d'expérimentation

Innovante, l'opération constitue un support d'expérimentation sur le chauffage dans les bâtiments BBC, dans le cadre du projet « vecteur Air Bois » initié avec le Cluster éco-habitat. Un laboratoire de l'université de La Rochelle réalise quant à lui une étude sur l'intérêt des toitures terrasses végétalisées sur le confort et la consommation énergétique.



Étude d'un système combiné de ventilation et de chauffage au bois dans les bâtiments à basse consommation d'énergie

Ce travail porte sur l'étude et le développement d'un système innovant de ventilation et de chauffage au bois dans les habitations à basse consommation d'énergie, qui sont appelées à devenir la référence constructive en France dès 2015. Dans ces habitations fortement isolées et particulièrement étanches à l'air, les besoins de chauffage sont très faibles et peuvent être couverts par une source de chaleur d'origine renouvelable, telle que le bois énergie. En outre, l'utilisation d'une ventilation performante s'impose comme étant un critère essentiel pour assurer la bonne qualité de l'air intérieur et peut même devenir l'unique vecteur de chauffage en apportant l'appoint de chaleur sur l'air insufflé dans les différentes pièces de l'habitation. Le système présenté dans cette étude propose ainsi de combiner les avantages d'un appareil de chauffage au bois de petite puissance, ici un poêle à granulés de bois, et ceux d'une ventilation à récupération de chaleur sur l'air extrait, grâce à un conduit échangeur intégré à la cheminée du poêle et relié au réseau de soufflage de la ventilation. Développé en partenariat avec l'industriel POUJOULAT, spécialisé dans la fabrication de conduits de cheminée métalliques, ce conduit échangeur permet de récupérer sur l'air neuf une partie de la chaleur initialement perdue par les fumées et de la distribuer dans toutes des zones de vie de l'habitation, même les plus éloignées de l'appareil au bois. Après avoir défini la configuration de couplage à adopter pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble et garantir à la fois la sécurité et le confort des occupants, les performances de plusieurs prototypes de conduit échangeur sont caractérisées expérimentalement. Les résultats obtenus lors des essais en laboratoire permettent alors d'orienter l'évolution des prochains prototypes et de souligner la nécessité de travailler avec un poêle à granulés de bois dont le cycle de combustion est étanche. Un modèle mathématique est également développé pour prédire les performances du dernier prototype de conduit échangeur à triple paroi non isolé sur sa surface extérieure et sa validation est obtenue suite au bon accord entre les résultats calculés et ceux mesurés lors des essais. L'ensemble du système combiné est ensuite installé dans deux habitations à basse consommation d'énergie situées près de Poitiers. L'exploitation des températures et des consommations recueillies pendant la première saison de chauffe montre la bonne tenue du système combiné, ses limites, ainsi que ses conditions d'appropriation par les occupants, dont le comportement apparaît jouer un rôle prédominant dans la réduction des consommations énergétiques.

Mots clés : bâtiment basse consommation d'énergie, système combiné, chauffage à air, ventilation à récupération de chaleur, poêle à granulés de bois, échangeur de chaleur à triple tube concentrique, expérimentations, modèle mathématique.

Study of a wood-based air-heating system combined with a heat recovery ventilation in low energy buildings

This work is devoted to the study and development of an innovative wood-based air-heating system for energy-efficient dwellings, which are expected to become the building reference in France from 2015 onwards. As these kinds of homes are highly insulated and particularly airtight, heating requirements are very low and may be covered by a renewable energy source, such as wood energy. In addition, efficient ventilation is absolutely required to ensure indoor air quality and may even sometimes be used as the only way to provide heat into the various rooms of the house. In this context, the system presented in this study aims to combine advantages of a low power wood-burning appliance, as a wood-pellet stove, and those of a mechanical ventilation heat-recovery unit, thanks to a heat exchanger integrated into the chimney of the pellet stove and connected to the ventilation air supply network. Developed in partnership with POUJOULAT, a metallic chimneys manufacturer, this new heat exchanger recovers a part of the heat from flue gases and enables to warm up the fresh air distributed in each living zone of the house, even the most remote of the wood heating device. After defining the best coupling configuration to ensure the proper behaviour of the system, as well as both safety and comfort of the occupants, performances of several heat exchanger prototypes are characterized experimentally. The results from tests in laboratory are then used to guide prototypes development and they highlight the need to work with a room-sealed wood-pellet stove. Moreover, a mathematical model is developed to predict the performances of the latest prototype of triple concentric tube heat exchanger with no insulation at the outer surface. Then, the model validation is obtained following the good agreement between calculated results and those measured during the laboratory tests. The combined system is then installed in two energy-efficient dwellings near Poitiers. Operating temperatures and energy consumptions collected during the first heating season show the good reliability of the combined system, its limitations and its conditions of acceptance by the occupants, whose behaviour is pointed out as a major factor in reducing energy consumptions.

Keywords: low energy building, combined system, air heating, heat-recovery ventilation, wood-pellet stove, triple concentric tube heat exchanger, experiments, mathematical model.