

maisons paysannes de france

Connaissance des bâtiments anciens & économies d'énergie

Rapport de synthèse

Maisons Paysannes de France

8 passage des Deux Sœurs
75009 Paris

Tél. 01 44 83 63 63, Fax 01 44 83 63 69
maisons.paysannes@wanadoo.fr



maisons
paysannes
de france



NOTICE ANALYTIQUE

Titre de l'étude	Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie	
Maître d'ouvrage de l'étude	Direction générale de l'urbanisme de l'habitat et de la construction / bureau QC2 Étude suivie par : - M.-C. Roger - P. Viola	
Maîtrise d'œuvre de l'étude	Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Est (CETE de l'Est) Laboratoire de Strasbourg – groupe construction Référence : 2004 75 018 - Étude suivie par : - B.-G. Royet - J. Burgholzer	
	Département génie civil et bâtiment – Laboratoire des Sciences de l'Habitat - ENTPE Étude suivie par : - G. Guarracino - R. Cantin	
	Maisons Paysannes de France (MPF) Étude suivie par : - M. Fontaine - S. Tamelikecht	
Restitution	Présent rapport de synthèse : (août 2007) 71 pages	<i>Rapports d'avancement intermédiaires :</i> - <i>Protocole de mesures (avancement phase 1)</i> - <i>Synthèse des données recueillies sur les bâtiments du panel (avancement phase 2)</i> - <i>Analyse individuelle des bâtiments (avancement phase 3)</i>
Mots-clés	Bâtiments anciens, comportement thermique, analyse in situ, simulations thermiques	
Résumé	La présente étude s'inscrit dans le cadre des travaux de transposition de la directive européenne 2002 / 91 / CE sur la performance énergétique des bâtiments existants. Reposant sur une double approche (analyse du comportement in situ, simulation théorique), cette étude met en évidence : - Les propriétés thermiques particulières du bâti ancien : influence du contexte local, comportement bioclimatique, dispositions constructives particulières au niveau des liaisons planchers-façade, des ouvertures, etc. - La non adéquation des moteurs de calcul actuels : les différences observées entre les consommations réelles et les consommations théoriques, ainsi que l'analyse de la structure des méthodes mettent en évidence certaines difficultés de modélisation des caractéristiques thermiques du bâti ancien.	
Abstract	This study joins within the framework of the works of transposition of the european directive 2002 / 91 / CE on the energy performance of the existing buildings. Basing on a double approach (analysis of the real behavior, theoretical simulation), this study brings to light : - the particular thermal properties of the former(ancient) built: influence of the local context, bioclimatic behavior, particular constructive capacities at the level of the connections floors-facade, openings, etc. -The not adequacy of the current thermal models: the observed differences between the real consumptions and the theoretical consumptions, as well as the analysis of the structure of the methods bring to light certain difficulties of modelling the thermal characteristics of the ancient built.	

PREAMBULE

La directive européenne 2002 / 91 / CE sur la performance énergétique des bâtiments a été adoptée par le Parlement européen et le Conseil de l'union européenne le 16 décembre 2002 et publiée au Journal officiel des communautés européennes le 4 janvier 2003. Cette directive envisage l'adaptation de la réglementation énergétique actuelle aux bâtiments existants et aux spécificités régionales.

Partant du constat que le patrimoine bâti français est très hétérogène, la recherche d'économies d'énergie dans les bâtiments existants doit être engagée avec une grande prudence. En particulier, les bâtiments dits « anciens »* sont régis par un fonctionnement physique relativement méconnu et très différent de celui des bâtiments d'après-guerre (l'apparition de procédés industriels ayant considérablement modifié les ouvrages dans leur conception). Les principaux matériaux anciens (pierres, bois, mortiers, terres crues ou cuites,...) présentent ainsi un équilibre hygrothermique subtil et sont très sensibles aux conditions d'humidité.

L'objectif de cette étude est de mieux connaître le comportement thermique de ce patrimoine bâti et d'observer sa prise en compte par les méthodes de calcul actuelles.

*** Dans cette étude, on entend par bâti ancien : « bâti généralement conçu avant le début du 20^{ème} siècle et l'émergence en architecture du mouvement moderne (< 1950). Il se caractérise notamment par l'emploi de techniques constructives et de matériaux non industrialisés, subordonnés à un contexte local. »**

SOMMAIRE

1	CONTEXTE DE L'ETUDE	6
1.1	BATIMENTS EXISTANTS & ECONOMIES D'ENERGIE	6
1.2	AU SEIN DU BATI EXISTANT : DES DIFFERENCES CONSTRUCTIVES FONDAMENTALES - CAS DU BATI ANCIEN	9
1.3	LES ENJEUX DE LA REHABILITATION DU BATI ANCIEN	10
2	OBJECTIFS DE L'ETUDE	12
2.1	MISE EN EVIDENCE DU COMPORTEMENT THERMIQUE SPECIFIQUE DES BATIMENTS ANCIENS	12
2.2	ANALYSE DES METHODES DE CALCUL ACTUELLES	12
3	METHODOLOGIE DE L'ETUDE	13
3.1	CONSTRUCTION DU PANEL D'ETUDE	13
3.2	UNE APPROCHE SYSTEMIQUE	15
3.3	RECUEIL DES DONNEES ET METROLOGIE EMPLOYEE	15
3.4	ANALYSE DU COMPORTEMENT REEL DU BATIMENT	18
3.5	ANALYSE THEORIQUE (CALCULS ET SIMULATIONS)	19
4	RESULTATS DE L'ETUDE (1) : COMPORTEMENT THERMIQUE REEL / SIMULE DU BATI ANCIEN	23
4.1	COMPORTEMENT THERMIQUE D'HIVER	23
4.2	COMPORTEMENT THERMIQUE D'ETE	30
5	RESULTATS DE L'ETUDE (2) : MISE EN EVIDENCE DES SPECIFICITES DU BATI ANCIEN	32
5.1	L'ENVIRONNEMENT ET L'IMPLANTATION	33
5.2	L'ORGANISATION DES ESPACES INTERIEURS (LA DISTRIBUTION)	38
5.3	LE MODE CONSTRUCTIF	41
5.4	L'ENVELOPPE (PAROIS OPAQUES)	45
5.5	LES OUVERTURES	53
5.6	LES EQUIPEMENTS	57
5.7	LES OCCUPANTS	59
6	CONCLUSION GENERALE	63
6.1	LES SPECIFICITES DU BATI ANCIEN – TABLEAU SYNTHETIQUE	63
6.2	LA PRISE EN COMPTE DE CES SPECIFICITES DANS LES LOGICIELS DE CALCUL ACTUELS	65
6.3	PERSPECTIVES DE L'ETUDE : LA CREATION D'UN MODELE PHYSIQUE ADAPTE AU BATI ANCIEN...	67
7	TABLE DES ILLUSTRATIONS	68
8	BIBLIOGRAPHIE	70

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1 Bâtiments existants & économies d'énergie

1.1.1 La nécessaire réduction des consommations énergétiques des bâtiments existants

Dans le contexte environnemental actuel et depuis la signature du protocole de Kyoto visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, la notion d'économie d'énergie apparaît comme une nécessité.

En France, le secteur du bâtiment apparaît en première position dans le bilan énergétique national : il absorbe 43,6% de la consommation d'énergie finale du pays, avant le transport qui compte pour 31,5%, et l'industrie pour 23,1%.

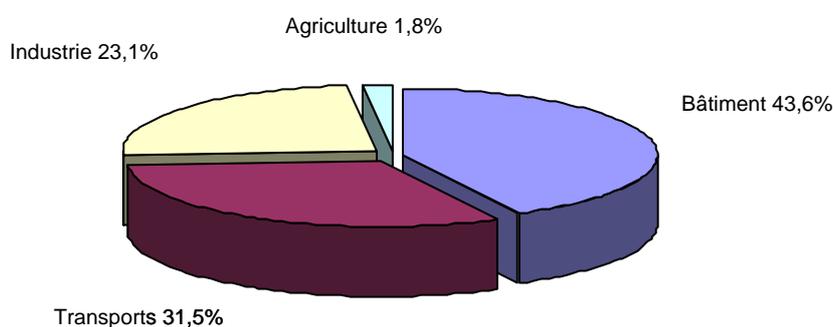


Figure 1 : Consommation d'énergie finale par secteur d'activités, en France - 2006 (source : Observatoire de l'Énergie – DGEMP)

Concernant l'émission de gaz à effet de serre, il se situe en deuxième position derrière les transports parmi les secteurs responsables.

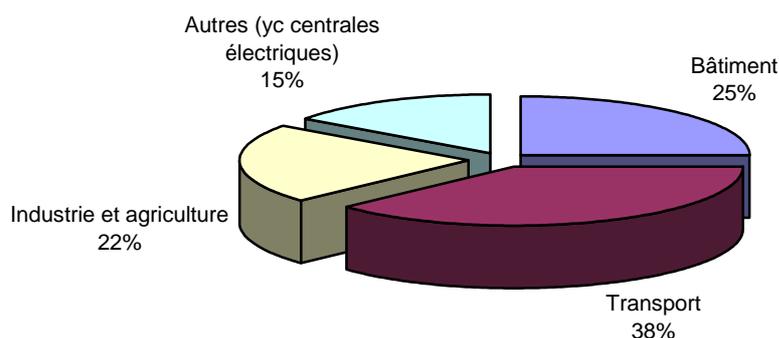


Figure 2 : Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France - 2006 (source : ADEME)

Enfin, on estime que, au sein du secteur du bâtiment, le parc existant aujourd'hui représenterait toujours **deux tiers du parc de 2050** [source : *Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif, avril 2001*], compte tenu d'un renouvellement annuel relativement faible.

Ainsi, pour atteindre l'objectif général de réduction d'un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, nous constatons bien que **l'essentiel de l'effort doit porter sur la réhabilitation énergétique du parc bâti existant.**

1.1.2 Le contexte réglementaire

1.1.2.1 La directive européenne 2002/91/CE sur la performance énergétique des bâtiments existants

Au regard des objectifs fixés par le protocole de Kyoto, il était nécessaire de disposer d'un cadre réglementaire, permettant la mise en place d'actions concrètes afin de réaliser des économies d'énergie dans le domaine des bâtiments existants. C'est ainsi que la directive 2002/91/CE du parlement européen et du conseil de l'union européenne fut publiée dans le journal officiel des communautés européennes du 04/01/2003. L'objectif principal de cette directive est de promouvoir l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments dans la Communauté Européenne. Cette amélioration devra être réalisée en fonction des conditions climatiques et des particularités locales, ainsi que des exigences en matière de climat intérieur et du rapport coût-efficacité.

Cette directive oblige tous les états membres à appliquer, dès 2006, une méthode de calcul pour évaluer la performance énergétique des bâtiments qui s'inscrit dans un cadre général établi. D'autre part, les bâtiments neufs, ou existants de grande taille lorsque ces derniers font l'objet de travaux de rénovation importants, devront respecter des exigences minimales en matière de performance énergétique.

1.1.2.2 La réglementation française

a) Le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE)

Extrait du site de la DGUHC : www.logement.gouv.fr :

En application de l'article L 134-2 du CCH, le diagnostic de performance énergétique devra être joint aux promesses de vente et aux actes de vente des biens immobiliers à compter du 1^{er} novembre 2006 et aux contrats de location à partir du 1^{er} juillet 2007. Il fera alors partie du dossier de diagnostic technique créé par l'ordonnance du 10 juin 2005 relative au logement et à la construction, qui comprend également, selon les cas, les autres types de diagnostics : amiante, plomb, termites, risques naturels, gaz (articles L. 271-4 à 6 et article L.134-1 à 5 du CCH).

Les candidats acquéreurs ou locataires pourront aussi obtenir ce diagnostic de performance énergétique, à leur demande, dès que le bien sera mis en vente ou en location.

Il permettra au candidat acquéreur ou locataire :

- *d'être informé sur les caractéristiques thermiques (chauffage, production d'eau chaude, etc.) du bien qu'il souhaite acheter ou louer, sur ses consommations d'énergie, sur une estimation des coûts dues à ces consommations,*
- *d'être sensibilisé à la lutte contre l'effet de serre, par l'évaluation de la quantité de gaz à effet de serre émis en raison de la consommation d'énergie du bien, et par les « étiquettes énergie » qui classeront cette consommation et cette quantité de gaz émis en fonction d'une échelle A à I.*
- *d'être incité à réaliser des travaux d'économie d'énergie, grâce à des recommandations de travaux..*

b) La réglementation thermique des bâtiments existants

Extrait du site de la DGUHC : www.logement.gouv.fr :

Les dispositions mises en place pour les bâtiments existants reposent sur l'article L. 111-10 du Code de la construction et de l'habitation introduit par la loi du 13 juillet 2005. Le décret d'application du 19 mars 2007 fixe les principes des mesures prévues pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments existants,

lorsque ceux-ci font l'objet de travaux de rénovation. Le dispositif réglementaire se décline en deux types de mesures, selon la taille du bâtiment considéré.

- *Des mesures spécifiques aux bâtiments de plus de 1000 m² qui font l'objet d'une rénovation lourde (article R. 131-26 et R. 131-27)*

Elles s'appliquent aux bâtiments de surface hors œuvre nette supérieure à 1000 m², qui font l'objet de rénovations importantes (c'est à dire dont le coût excède 25 % de la valeur du bâtiment hors foncier), touchant l'enveloppe ou les installations de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de refroidissement, de ventilation ou d'éclairage.

On considère qu'à l'occasion de ces travaux qui ont un impact important sur la performance énergétique du bâtiment, le maître d'ouvrage doit améliorer la performance globale. La consommation d'énergie du bâtiment réhabilité, calculée à l'aide d'une méthode de calcul réglementaire, sera donc limitée par des seuils. Des solutions techniques réputées satisfaire la réglementation seront également définies afin d'offrir un mode de respect simplifié de la réglementation et d'orienter les maîtres d'ouvrage dans leurs choix de travaux.

Par ailleurs, si la consommation d'énergie doit être limitée, les travaux ne doivent pas pour autant entraîner de dégradation du confort en été ou de la qualité du bâti (condensations d'eau, moisissures,...).

En outre, préalablement aux travaux, une étude de faisabilité des différents approvisionnements en énergie est demandée : Le maître d'ouvrage devra étudier la faisabilité d'un approvisionnement en énergie renouvelable, du raccordement à un réseau de chaleur, ainsi que la faisabilité de l'utilisation de matériels performants tels que les pompes à chaleurs ou les chaudières à condensation.

Ces dispositions seront applicables pour les travaux dont la date de dépôt de la demande du permis de construire, ou à défaut de permis la date d'acceptation des devis ou de passation des marchés est postérieure au 31 mars 2008.

- *Des mesures spécifiques aux autres cas (article R. 131-28)*

Ces obligations s'appliquent dans tous les cas de travaux plus « diffus » qui ne sont pas couverts par l'article R. 131-26.

Dans ces cas, l'exigence porte sur la performance des éléments installés ou remplacés à l'occasion de « petits » travaux (comme par exemple un changement de fenêtre ou la pose d'un matériau isolant, ou bien la rénovation lourde d'une maison individuelle). Cette exigence permet d'éviter les travaux peu rentables du point de vue énergétique.

L'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants liste l'ensemble des éléments visés et donne les exigences associées.

Ces dispositions seront applicables pour les travaux dont la date d'acceptation des devis ou de passation des marchés, ou a défaut la date d'acquisition des matériels visés est postérieure au 31 octobre 2007.

La présente étude contribue en partie à la mise en application de ces nouveaux dispositifs réglementaires.

Face à la nécessaire réduction des consommations énergétiques dans les bâtiments existants, elle vise essentiellement à développer une meilleure connaissance (points forts, faibles, risques éventuels...) du patrimoine bâti ancien sur lequel nous sommes amenés à intervenir.

1.2 Au sein du bâti existant : des différences constructives fondamentales - cas du bâti ancien

De nombreuses études et autres statistiques font apparaître deux catégories de bâtiments :

- les bâtiments « neufs », construits selon les réglementations thermiques (RT) 1975 et suivantes
- les bâtiments « existants », antérieures à ces réglementations (<1975).

S'il est vrai que, depuis les années 70, les exigences d'isolation des bâtiments ont été considérablement et régulièrement renforcées, il serait **très simpliste et dangereux de regrouper dans une même catégorie de performance, tous les bâtiments conçus avant 1975.**

Secteur	Usage	Bâtiments <1975	Bâtiments neufs	Ensemble actuel
Résidentiel	Chauffage kWh/m ² /an	328	80 à 100	210
	ECS ¹ kWh/m ² /an	36	40	37,5
	Electricité à usage spécifique (kWh/pers/an)	1000	1000	1000
Tertiaire	Chauffage kWh/m ² /an	209	155	196
	ECS ¹ kWh/m ² /an	19	40	29
	Electricité à usage spécifique (kWh/m ² /an)	?	?	96

Figure 3 : Répartition des consommations énergétiques des bâtiments / confusion des bâtiments construits avant 1975 – Source INSEE 2003

Cette confusion, couramment effectuée, est très réductrice : elle ne tient pas compte de la grande diversité des modes constructifs. Pour appréhender au mieux la réhabilitation énergétique des bâtiments, il convient de prendre en compte ces deux échelles d'évolution :

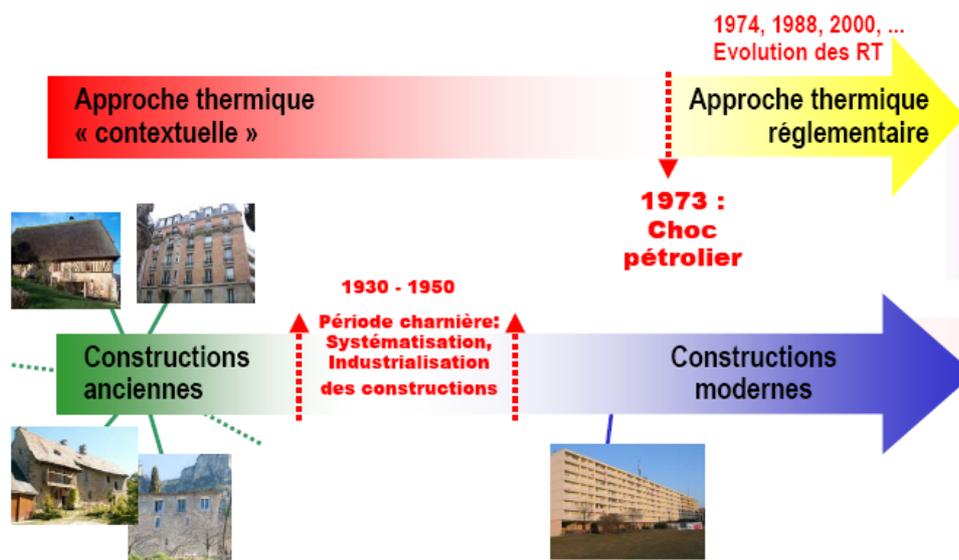


Figure 4 : Schéma présentant les évolutions non parallèles des réglementations thermiques (flèche supérieure) et des modes constructifs (flèche inférieure)

Concernant l'histoire des modes constructifs, nous pouvons considérer une « période transitoire », constituée par le début du 20^{ème} siècle. Cette période marque en effet de réels changements dans l'évolution des modes constructifs des bâtiments d'habitation : nous passons ici d'une architecture dite « haussmannienne » à une architecture « moderne » de plus en plus industrialisée, qui apparaît au début du 20^{ème} siècle et se développe largement après la seconde Guerre Mondiale.

Les éléments qui permettent d'effectuer cette distinction constructive sont, de façon non exhaustive :

- la disparition des savoir-faire après l'hécatombe humaine de la première guerre mondiale, en particulier de celle des artisans de la construction (maîtrise des détails constructifs, assemblages et dimensionnement de matériaux pour obtenir une meilleure performance et une plus longue conservation),
- l'apparition de nouveaux matériaux de construction manufacturés plus facilement mis en œuvre (planchers en béton armé, structures poteaux-poutres, parpaings en terre cuite ou en béton), aux propriétés hygrothermiques différentes ;
- les contraintes d'urbanisme dues au prix et à la raréfaction des terrains de construction, qui ne permettaient plus de construire en tenant compte de l'environnement proche (orientations selon l'ensoleillement, les vents dominants, etc),
- la demande massive de logements due au développement économique.

Du point de vue de la thermique il s'agit d'une mutation très importante :

- D'une architecture qui s'appliquait à prendre en compte l'environnement climatique, utilisant des ressources et des matériaux locaux, on est passé à une architecture industrialisée, assujettie à des contraintes d'urbanisme, employant des nouveaux matériaux de construction aux propriétés hygrothermiques très différentes.
- C'est aussi le début d'un certain désengagement du concepteur vis-à-vis des conditions du site (rendu possible par le développement des techniques). Le début du 20^{ème} siècle marque ainsi le début de la production de « logements hermétiques » ventilés, chauffés et éclairés artificiellement, et dont le fonctionnement thermique est relativement déconnecté du milieu environnant.

Face à cette importante différenciation des techniques constructives, il convient d'aborder la problématique des économies d'énergie dans le « bâti ancien » avec la plus grande prudence.

1.3 Les enjeux de la réhabilitation du bâti ancien

On estime que les logements anciens (<1948) représentent un tiers du parc existant :

	Logements construits avant 1948	Logements construits entre 1949 et 1979	Logements Construits entre 1975 et 1998	Total
Part	33 % soit près de 10 Millions de logements	33 %	34 %	100% = 29,6 Millions

Figure 5 : Répartition du nombre de logements existants, par année de construction, en 2002 (source MELTLM – compte logement)

L'enjeu primordial concernant les bâtiments anciens, directement fixé par le contexte environnemental et réglementaire actuel, est la réduction des consommations énergétiques.

Mais une réhabilitation « durable » de notre patrimoine bâti doit également être accompagnée d'une réflexion sur :

- L'enjeu du confort d'été :
La réhabilitation doit se faire selon une approche globale du bâtiment, intégrant notamment son comportement d'hiver et son comportement d'été.
- Les enjeux économiques :
Liés à des réhabilitations qui pourraient s'avérer lourdes, peu rentables voire inadaptées au bâti ancien.
- La pérennité de notre patrimoine bâti :
Des réaménagement brutaux ou inadaptés peuvent entraîner une perte de qualités intrinsèques, voire des pathologies ou une réduction de la durée de vie de ces constructions.

2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

D'une façon générale, cette étude vise à contribuer à une réhabilitation « durable » de notre parc bâti ancien.

Partant du constat que ce patrimoine présente des caractéristiques spécifiques et relativement méconnues, la présente étude suit deux objectifs principaux :

- **Mettre en évidence le comportement thermique spécifique du bâti ancien,**
- **Analyser la prise en compte de ce comportement par les méthodes de calcul actuelles.**

2.1 Mise en évidence du comportement thermique spécifique des bâtiments anciens

Le premier objectif consiste à mettre en évidence le **comportement thermique spécifique** du bâti ancien.

L'étude devra faire apparaître :

- Les performances thermiques réelles du bâti ancien, examinées au regard des consommations énergétiques,
- Les caractéristiques spécifiques du bâti ancien, en distinguant les différents systèmes qui le composent (environnement, enveloppe, etc.) et qui contribuent à son comportement thermique d'hiver et d'été.

2.2 Analyse des méthodes de calcul actuelles

Le deuxième objectif de l'étude consiste à effectuer une analyse critique de nos méthodes de calcul actuelles, dans une perspective d'évolution réglementaire (prochaine RT bâtiments existants).

Il s'agit ici d'étudier la prise en compte du comportement thermique spécifique du bâti ancien par ces méthodes.

Plusieurs d'entre elles sont étudiées :

- *Méthode de diagnostic : 3CL*
- *Méthode réglementaire RT2000 : Clima-Win*
- *Méthode EC-Pro.*

Elles sont présentées dans le chapitre suivant.

3 METHODOLOGIE DE L'ETUDE

3.1 Construction du panel d'étude

▪ Une unité d'observation

Le logement constitue la typologie de bâtiments retenue pour l'étude. Au sein de ce type de construction, les variantes « logements individuels » et « logements collectifs » sont considérées.

▪ Les critères de sélection

Les spécimens retenus pour l'étude se veulent représentatifs des modes constructifs traditionnels, existants avant l'arrivée des matériaux modernes (béton, plastique,...). Ces bâtiments n'ont pas subi de modifications importantes, qui pourraient fausser l'analyse du mode constructif initial.

Par ailleurs, afin d'illustrer au mieux les divers modes constructifs régionaux, les logements retenus suivent une répartition géographique qui permet de couvrir l'habitat vernaculaire le plus répandu.

Pour l'établissement du panel de bâtiments, des critères de sélection principaux et complémentaires ont été définis avec l'association Maisons Paysannes de France (MPF) :

Critères minimaux :

- Le bâtiment doit être représentatif d'un mode constructif traditionnel du patrimoine bâti ;
- Le bâtiment doit présenter une surface habituelle de ce type d'habitat et avec une occupation permanente ;
- Le bâtiment doit se présenter dans une organisation conforme à l'état initial ;
- Pour les immeubles collectifs, le logement étudié doit être situé en étage courant ;
- Le bâtiment doit mettre en œuvre des matériaux locaux habituels ;
- L'environnement proche du bâtiment doit également être représentatif : orientation type, mitoyenneté habituelle, espaces tampons usuels ;
- Le bâtiment doit présenter un mode de chauffage permettant une estimation assez précise de l'énergie consommée ;

Critères complémentaires souhaités (facultatifs) :

- Existence d'un dossier de plans, ou à défaut d'une description de la composition des murs ;
- Pas de travaux envisagés à court terme ;
- Pas de changement d'occupant en perspective pour les trois prochaines années ;

▪ Présentation du panel de bâtiments étudiés

L'association Maisons Paysannes de France a fourni une liste de bâtiments répondant aux critères énumérés ci-dessus.

Le nombre de spécimens retenus pour l'étude est de 10 bâtiments anciens et 1 bâtiment de construction contemporaine. Celui-ci est nommé dans l'étude « logement témoin » car il respecte la réglementation thermique RT2000, sur laquelle sont fondés certains moteurs de calcul analysés dans l'étude.

Ci-dessous est présentée la liste des logements retenus pour l'étude :

1. Collectif Haussmannien – PARIS
2. Collectif Période Allemande – STRASBOURG
3. Collectif brique - TOULOUSE
4. Individuel Tuffeau - BORDS DE LOIRE
5. Collectif Pierre - PARIS
6. Individuel terre crue – REIMS
7. Individuel pierre calcaire – Arrière pays niçois
8. Individuel granit – BRETAGNE
9. Individuel archaïque – CORREZE
10. Individuel bois / torchis – NORMANDIE
11. Logement Témoin RT2000 – ALSACE

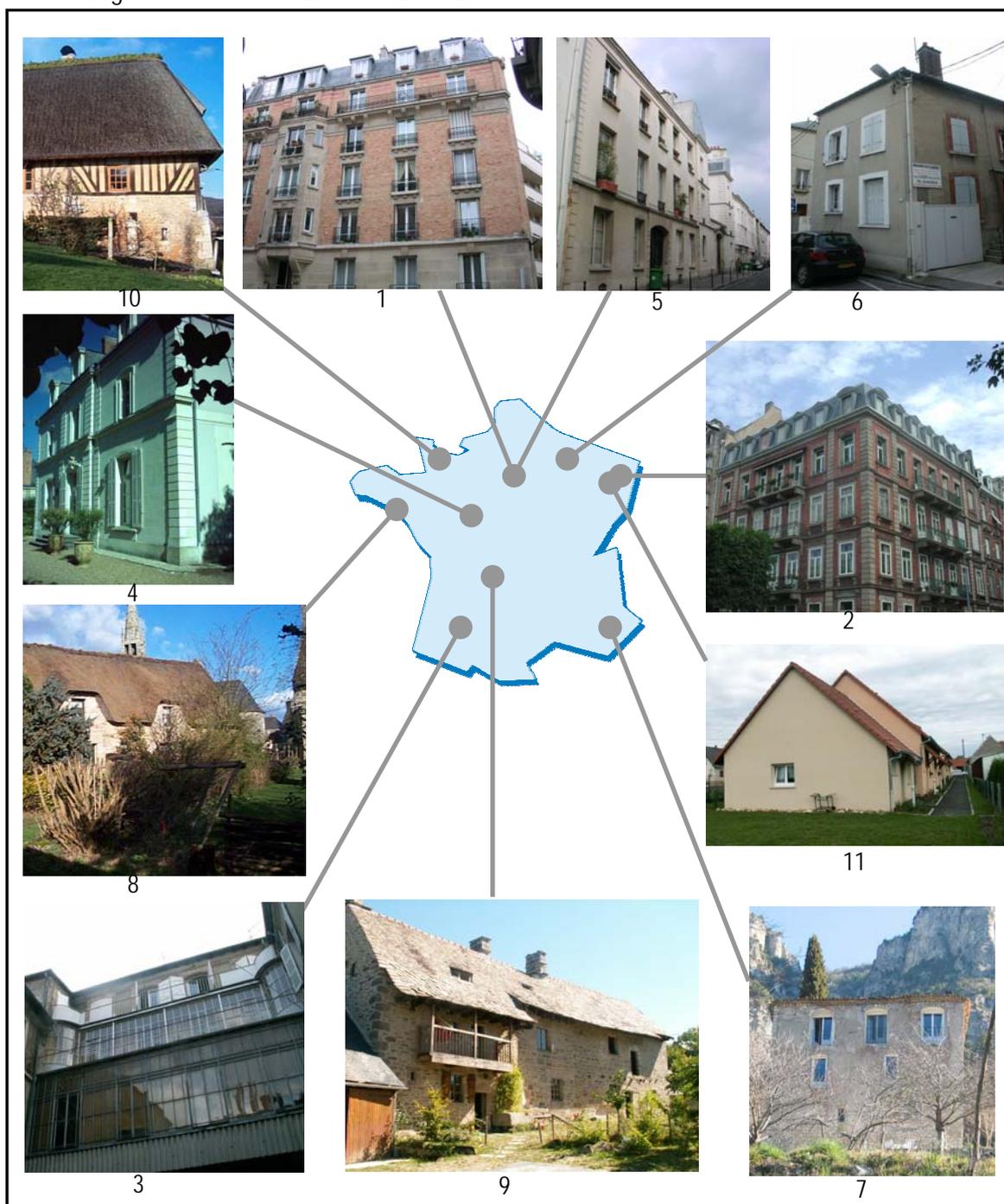


Figure 6 : Répartition géographique des bâtiments du panel d'étude

3.2 Une approche systémique

L'étude consiste en une « approche globale » du problème des économies d'énergie dans l'habitat ancien : elle combine des enquêtes de terrain et des simulations théoriques.

Par ailleurs, nous suivons dans l'étude une approche « systémique » : le comportement thermique d'un bâtiment est ici considéré comme le centre d'un système aux paramètres multiples (climat, matériaux de construction, mode de vie...) et interdépendants.

Les systèmes suivants, qui déterminent le comportement thermique du bâtiment, ont été pris en compte:

- L'environnement et l'implantation
- L'organisation intérieure (distribution, organisation des pièces, espaces tampons...)
- Le mode constructif (procédés constructifs, liaisons entre les éléments du bâtiment,...)
- L'enveloppe (constitution et propriétés des parois opaques)
- Les ouvertures
- Les équipements techniques
- Les occupants

Chaque système est caractérisé par des données, recueillies pour chaque bâtiment et présentées dans le paragraphe suivant.

3.3 Recueil des données et métrologie employée

3.3.1 Données recueillies par bâtiment

Différents moyens ont été mis en œuvre pour le recueil des données :

- enregistrements in situ de température et d'humidité relative (T,Hr)
- thermographie infrarouge (IR)
- relevés in situ (plans, coupes, autres relevés dimensionnels)
- questionnaires aux occupants
- sources écrites

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des données recueillies, par composante :

Composante du bâtiment	Données recueillies	Moyens employés
Environnement et implantation	Localisation : coordonnées géographiques	Relevés In situ
	Climat : zone climatique, ensoleillement moyen	Serveur web (Satel-Light)
	Climat local : température et humidité extérieures sur site	Enregistrements In Situ (T, H)
	Descriptif du site : type de végétation alentour, tissu de construction, mitoyenneté, masques solaires	Relevés In situ
	Implantation et orientation du bâtiment	Relevés In situ
Organisation intérieure	Plans, coupes, façades du bâtiment	Relevés In situ
	Distinction thermique des espaces (espaces tampons, pièces chauffées)	Relevés In situ

Mode constructif	Type de structure, éléments porteurs	Relevés In situ
	Nature des liaisons (plancher – mur ; refend – façade)	Thermographie IR
Enveloppe (parois opaques)	Constitution et épaisseur des parois courantes	Relevés In situ
	Propriétés thermiques (conductivité, masse volumique, capacité thermique)	Sources écrites (O.SIDLER , ADEME , Guide du logements à faible consommation énergétique, 2000)
Ouvertures	Type d'ouverture, de vitrage, de fermeture	Relevés In situ
	Dimensions (surface, épaisseur vitrage)	Relevés In situ
	Étanchéité à l'air	Thermographie IR
Équipements techniques	Caractéristiques des équipements de chauffage et d'ECS : production, réseau de distribution, émission, mode de gestion	Questionnaires aux occupants
	Consommations énergétiques (chauffage + ECS)	Factures énergétiques fournies par l'occupant
	Caractéristiques des autres équipements (ventilation, éclairage)	Questionnaires aux occupants
Occupants	Scénario d'occupation : présence – absence sur différentes périodes types : journée, semaine, année	Questionnaires aux occupants
	Scénario de gestion du chauffage et de la ventilation naturelle sur différentes périodes types : journée, semaine, année	Questionnaires aux occupants

3.3.2 Métrologie employée

1) Enregistreurs de température et d'humidité relative

Pour chaque bâtiment, des mesures de température et d'humidité ont été effectuées de façon continue, sur une période annuelle (février 2005 – février 2006).

L'objectif est de faire apparaître le comportement du bâtiment en fonction des saisons. On peut ainsi évaluer :

- le confort d'hiver,
- le confort d'été,
- le comportement inertiel des bâtiments en mi-saison.

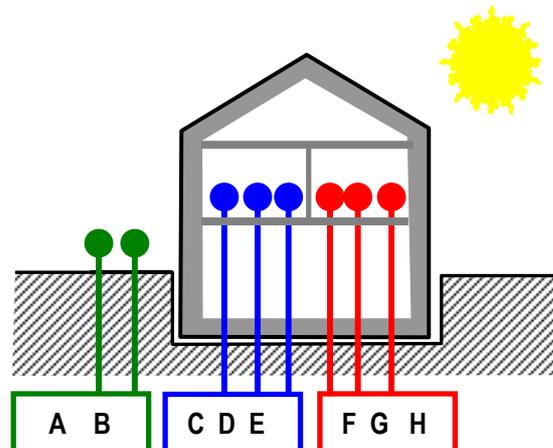
Par ailleurs, l'implantation des capteurs doit permettre d'étudier le comportement thermique du bâtiment, en fonction des espaces qui le composent. La configuration retenue permet des mesures dans les trois espaces représentatifs suivants : l'environnement extérieur direct du bâtiment, la pièce de vie, la pièce la plus ensoleillée.

Pratiquement, le recueil de ces données s'est fait par des enregistreurs autonomes, selon un pas de temps de 2 heures permettant des mesures sur une longue période (une année complète), tout en limitant le nombre de déplacements.

Le tableau ci-dessous présente les différents capteurs disposés dans chaque bâtiment.

Repère	Identification	Enregistreurs	Sondes
A	Température de l'air extérieur sous abri	HOBO H 08 – 032 - 02 étanche	intégrée dans enregistreur
B	Humidité relative de l'air extérieur sous abri		intégrée dans enregistreur
C	Température de l'air intérieur dans une pièce représentative (généralement la pièce de vie)	HOBO H 08 - 007- 02	intégrée dans enregistreur
D	Humidité relative de l'air intérieur dans une pièce représentative (généralement la pièce de vie)		intégrée dans enregistreur
E	Température résultante sèche dans une pièce représentative (généralement la pièce de vie)		Thermomètre à boule HOBO H 08 007 02
F	Température de surface de la face intérieure du mur ensoleillé (dans la pièce la plus ensoleillée)	HOBO H 08 - 007- 02	sonde de surface HOBO – TMC 6 - HA
G	Température de l'air intérieur (dans la pièce la plus ensoleillée)		intégrée dans enregistreur
H	Humidité relative de l'air intérieur (dans la pièce la plus ensoleillée)		intégrée dans enregistreur

Figure 7 : Schéma de mise en place des enregistreurs de température et d'humidité dans les logements :



NB : Pour plus de détails sur le protocole de mesures et les références des capteurs employés, se reporter à la note « Mesures In situ : présentation et protocole suivi » de décembre 2004.

2) La thermographie infrarouge

Des clichés infrarouges ont été réalisés lors des visites, sur chaque bâtiment.

Ces investigations infrarouges ont pour objectif de caractériser certaines valeurs à introduire dans les calculs théoriques ou de prendre en compte des hétérogénéités thermiques non décelables à l'œil nu, en particulier :

- la classe d'étanchéité à l'air des menuiseries (qui peut ainsi être différenciée selon les façades ou selon l'ancienneté),
- des modifications de coefficients U de certaines surfaces de parois dont les thermogrammes font apparaître des hétérogénéité (anciennes ouvertures obturées par exemple) ;
- la présence ou absence – à certaines jonctions de parois – de ponts thermiques.

Matériel thermographique utilisé dans cette étude :

Camera Infrarouge avec écran LCD avec possibilité d'enregistrement séquentiel, avec logiciel de traitement d'images.

Marque commerciale : ThermaCAM PM 595 (de FLIR System).

- *Bande spectrale de travail* : 7,5 à 13 μm .
- *Plage de mesure de température du sujet* : - 40 à + 500°C
- *Précision de mesure* : $\pm 2\%$,
- *Sensibilité thermique* : < 0,1°C,
- *Type de détecteur* : Focal plane area (FPA), 320 x 240 pixels

3.4 Analyse du comportement réel du bâtiment

L'analyse du comportement réel de chaque bâtiment s'appuie sur l'ensemble des données recueillies (cf. paragraphe 3.3.1).

Le comportement thermique réel d'un bâtiment est évalué au regard des :

- Des consommations énergétiques exprimées en kWh ep /m².an (couvrant les postes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire)
- Des enregistrements de température et d'humidité effectués in Situ.
- Des questionnaires d'enquête soumis aux occupants.

L'analyse tient également compte :

- du mode d'occupation,
- des caractéristiques du bâtiment.

Concernant plus particulièrement l'analyse des enregistrements, le choix a été fait de considérer différentes périodes :

➤ 4 périodes saisonnières :

- **Une période de quinze jours en saison hivernale** – afin d'examiner les situations où le système de chauffage compense les pertes thermiques du logement.
- **Deux périodes de quinze jours en mi-saison** (printemps et automne) – afin d'examiner les situations où les apports « gratuits » prennent une part significative dans la compensation des pertes thermiques du logement.
- **Une période de quinze jours en saison chaude** – afin d'examiner le comportement vis-à-vis du confort d'été du logement.

➤ **Des périodes journalières** (48h), repérées au sein de ces périodes saisonnières.

Pour chacune des périodes ci-dessus, nous recherchons par le calcul et pour chacun des 8 capteurs équipant les logements :

- les valeurs maximales et minimales
- les écarts-types
- les valeurs moyennes
- la corrélation linéaire entre températures intérieures et extérieures, ainsi qu'entre humidités intérieures et extérieures.

Les données graphiques ou résultats de calculs, combinés à la connaissance des bâtiments grâce aux données disponibles, nous permettent de proposer une **fiche synthétique d'analyse du comportement réel** destinée à mettre l'accent sur les points particuliers de chaque bâtiment étudié.

NB : Les résultats de l'analyse sont présentés, bâtiment par bâtiment, dans le rapport d'avancement - phase 3 – mars 2006.

3.5 Analyse théorique (calculs et simulations)

L'objectif est ici d'évaluer :

- l'adéquation entre le comportement réel du bâtiment et le comportement simulé,
- la prise en compte des propriétés thermiques du bâti ancien par des méthodes de calcul actuelles.

Plusieurs logiciels ont été utilisés :

- logiciel 3CL (versions 11 et 14) et méthodes 3CL. Il s'agit d'un logiciel développé pour le diagnostic de performance énergétique. Il fait appel à deux méthodes : l'une pour les logements collectifs, l'autre pour les maisons individuelles. Il est le logiciel retenu initialement dans cette étude pour évaluer la prise en compte des propriétés thermiques du bâti ancien.
- logiciel ClimaWin version 3.2 et méthodes RT2000. Ce logiciel ClimaWin, applicable pour les bâtiments neufs, a été utilisé pour compléter l'évaluation précédente du logiciel 3CL, en proposant une comparaison avec le bâtiment récent n°11.
- logiciel EC-Pro version prototype et méthodes de calcul. Le logiciel ECPro, issu d'un projet de recherche européen, a été développé pour la certification des maisons individuelles. Il a été utilisé, avec sa version prototype, pour compléter l'évaluation de 3CL.

NB : La saisie des bâtiments et les calculs sont effectués à partir des données synthétisées dans le rapport d'avancement – phase 2 - novembre 2005.

3.5.1 Présentation des outils de calcul utilisés

3.5.1.1 Logiciel 3CL (versions 11 et 14) et méthodes 3CL

Deux logiciels sont disponibles pour afficher les résultats des méthodes 3CL, l'un pour les maisons individuelles, et l'autre pour les appartements dans les immeubles collectifs. Dans cette étude, les versions 11 et 14 de ces logiciels ont été utilisées. Ils fonctionnent avec l'environnement MS-Excel.

Deux documents sont également disponibles, intitulés "Algorithmes de la méthode 3CL en maisons individuelles - V11" et "Algorithmes de la méthode 3CL en immeuble collectif". Ils présentent un

organigramme général, des formules de calcul des dépenses de chauffage, d'ECS, des auxiliaires de chauffage et de ventilation, de climatisation, des autres usages et des abonnements.

Plusieurs annexes complètent ces documents: données météorologiques, recherche de CORzone, algorithmes solaires, justificatifs et définitions.

Les paragraphes suivants (en italique) sont extraits des documents "Justificatifs de la méthode" TRIBU ENERGIE (16/03/2006) - Adresse: <http://www.logement.gouv.fr/>

La méthode de Calcul des Consommations Conventionnelles dans les Logements -> 3CL (Calculs des consommations conventionnelles dans les logements)

▪ **La méthode :**

Calcul des consommations de chauffage

Enveloppe :

Evaluation des surface par la méthode « je ne connais rien » : méthode 3615ADEME

Evaluation des niveaux d'isolation thermique selon l'année des travaux d'isolation : groupe de travail

Evaluation des coefficients K en décrivant le type de parois : ThK77

Apports : RT88

Climat : DEL2

Rendements : simplification RT88 avec modifications du groupe de travail

Calcul des consommations d'ECS

Besoins : RT88 + enquête INSEE(2000) -> RT2005

Rendements : simplification RT88 avec modifications du groupe de travail

Calcul des consommations de climatisation

Ratios EDF et simulations dynamiques PAPTER

Calcul de consommations des auxiliaires

Chauffage : ratios GDF et RT88

Ventilation : RT88

Calcul de consommations des autres usages (électriques et gaz)

Enquête INSEE(2000) et RT88

Prix des énergies et abonnements

Observatoire de l'énergie, RT88 et données fournisseurs d'énergie

Le détail de l'historique de la méthode est indiqué dans les compte-rendu de réunion et des modifications successivement apportées.

▪ **Justificatifs 3CL- Immeuble Collectif**

Ce document précise les principes, les hypothèses, les équations et les coefficients qui ont été utilisés pour élaborer la méthode d'affichage des consommations en immeubles collectifs.

La méthode d'affichage prend en compte les dépenses liées :

- ◆ *au chauffage,*
- ◆ *à l'ECS, aux auxiliaires de chauffage et de ventilation,*
- ◆ *à la climatisation,*
- ◆ *aux autres usages électriques et gaz (cuisson, éclairage, électroménager).*

La structure de cette méthode repose sur les choix suivants :

- *principes et certaines conventions de calcul de la méthode CSTB « DEL2 ».*
- *possibilités de calcul des déperditions sans description précise de la géométrie du logement : méthode s'appuyant sur une démarche périmétrique.*
- *plusieurs options de données d'entrée, en particulier pour le calcul des déperditions*
- *approche simplifiée du calcul des abonnements*
- *certaines conventions de calcul arrêtées pour la maison individuelle et applicable en collectif.*

▪ **Justificatifs 3CL-maison individuelle**

Ce document précise les principes, les hypothèses, les algorithmes et les coefficients qui ont été utilisés pour élaborer la méthode 3CL en maisons individuelles.

La méthode d3CL prend en compte les dépenses liées :

- ◆ au chauffage,
- ◆ à l'ECS,
- ◆ aux auxiliaires de chauffage et de ventilation,
- ◆ à la climatisation,
- ◆ aux autres usages électriques et gaz (cuisson, éclairage, électroménager).

La structure de cette méthode repose sur les choix suivants :

- principes et conventions de calcul de la méthode CSTB « DEL2 » et de la méthode utilisée dans l'outil télématique 3615 ADEME (« votre maison : quelles dépenses ? »)
- possibilités de calcul des déperditions sans description précise de la géométrie du logement : méthode s'appuyant sur une démarche typologique.
- plusieurs options de données d'entrée, en particulier pour le calcul des déperditions
- approche simplifiée du calcul des abonnements

3.5.1.2 Logiciel ClimaWin version 3.2 et méthodes RT2000

CLIMA-WIN 3.2 est une version présentée en 2004 du logiciel thermique intégré CLIMA-WIN, développé par la société B.B.S. SLAMA. Les différentes versions successives intègrent les évolutions réglementaires, les modifications des modes de calcul, les nouveautés concernant les données relatives aux équipements, les corrections des bugs informatiques des versions précédentes, etc.

Ce progiciel est composé de différents modules, dont certains font l'objet d'une procédure d'évaluation de la part du CSTB, pour pouvoir être certifiés et déclarés conformes aux normes. Il est commercialisé par module ou par pack complet. Parmi les modules disponibles, il y a :

- CLIMA-WIN THERMIQUE : module de calcul de déperditions et des coefficients réglementaires UBât et UBâtRef selon les règles Th-D 1991 et Th-U 2001. Différents types de calcul sont possibles : calcul du UBât et du UBât de référence par bâtiment pour les différents cas de figure prévus par la réglementation. L'utilisateur peut réaliser des calculs de déperditions globalement sur les locaux ou pièce par pièce.
- CLIMA-WIN CLIMATIQUE : module de calcul d'apports selon la méthode d'ASHRAE (Fundamentals 85) avec prise en compte des amortissements. Les calculs peuvent être effectués sur un local, une zone ou une affaire complète. Ce module peut faire l'objet d'une saisie commune avec le module THERMIQUE de manière à obtenir en une seule saisie des résultats hiver et été pour un local.
- CLIMA-WIN CONFORT d'été : module de détermination automatique de la température opérative corrigée atteinte suivant les hypothèses normalisées. Les calculs sont réalisés selon les règles Th-E 2001. Il calcule heure par heure la température opérative corrigée ainsi que la température de référence. Ce module fait l'objet d'une saisie commune avec le module THERMIQUE.
- CLIMA-WIN C+ : module de calcul de coefficient C selon les règles Th-C 2001. Le module traite les différents types de locaux prévus par la réglementation (locaux d'habitation individuels ou collectifs, hôtels, locaux de soins avec ou sans hébergement, bureaux, commerces, restauration, locaux d'enseignement, locaux sportifs, de rassemblement, de stockage, locaux industriels ou autres).
- CLIMA-WIN COMPORTEMENT : module de calcul de simulations de température et hygrométrie intérieures en cas de non climatisation, de climatisation insuffisante ou d'arrêt, volontaire ou non, de la climatisation. Ce module fonctionne avec le module CLIMATIQUE. Ce module peut faire l'objet d'une saisie commune avec le module THERMIQUE.
- CLIMA-WIN CONSOMMATIONS : module de calcul de consommations pour l'hiver et pour l'été. Le calcul est effectué en fonction des périodes de fonctionnement, des apports internes et solaires, du matériel installé ainsi que les rendements. Ce module fonctionne avec les modules THERMIQUE et CLIMATIQUE.

Disponibles sous forme d'un guide RT 2000, les règles de calcul sont décrites par la réglementation thermique 2000: Th-C, Th-E, Th-Bât/Th-I, Th-Bât/Th-S, Th-Bât/Th-U. Elles sont complétées par un état de l'art des performances énergétiques des éléments opaques et transparents.

3.5.1.3 EC-Pro version prototype et méthodes de calcul prEN832

Les paragraphes suivants (en italique) sont extraits du mémoire de thèse de Nadine Adra (2001).

Les méthodes de calcul utilisées (avec ECPro) reposent sur un bilan énergétique en régime permanent des pertes de chaleur et gains affectés et d'un taux de récupération prenant en compte l'effet dynamique des apports internes et solaires. L'hypothèse du régime permanent est généralement suffisante pour le calcul.

Le programme peut être utilisé pour les applications suivantes :

- *donner un label à la consommation standard d'un bâtiment*
- *comparer les consommations standard et réelle afin d'évaluer l'effet du mode d'occupation et du climat.*
- *proposer des mesures d'économie d'énergie*
- *évaluer l'effet d'éventuelles mesures d'économie d'énergie.*

La période de calcul utilisée est mensuelle. Pour cette période, l'outil calcule :

- *les déperditions*
- *les gains internes et solaires et leur taux de récupération*
- *les besoins nets en chauffage*
- *les pertes de chaleur des systèmes de chauffage et eau chaude sanitaire*
- *la consommation brute d'énergie dans les cas standard et réel*
- *les mesures d'économie d'énergie*

Par commodité, le développement de l'outil s'est fait dans l'environnement MS-Excel et MS-Visual Basic. Il est principalement composé de:

- *un code visual basic*
- *de feuilles de calcul Excel*
- *de tableaux et de graphes de résultats*
- *d'une bibliothèque de composants dans un classeur Excel (murs, planchers, plafonds, partitions, vitrages, systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire) et d'informations locales, telle que les climats.*

L'exécution du programme comprend :

- *la saisie des données : informations générales sur le projet et la fourniture d'énergie, choix du climat, données concernant le bâtiment (géométrie, enveloppe) et les systèmes (chauffage et eau chaude sanitaire).*
- *Trois niveaux de calcul (consommation standard, consommation réelle et économies d'énergie).*
- *la possibilité de relecture ou chargement d'un projet existant*
- *des possibilités de sauvegarde des entrées et des résultats.*

3.5.2 Application

La saisie des bâtiments et les calculs sont effectués à partir des données synthétisées dans le Rapport d'avancement – phase 2 - novembre 2005.

Les 3 logiciels ne demandent pas les mêmes informations en entrée, et les niveaux de saisie sont différents. La durée moyenne de saisie des données, à partir des rapports fournis, est très variable. Pour une étude de cas, c'est-à-dire pour une maison ou un logement, étant entendu que les rapports de diagnostics fournissent la totalité des données nécessaires, il faut compter, pour une saisie des données et les calculs :

- avec 3CL, plusieurs dizaines de minutes
- avec ClimaWin, de 5 à 15 jours
- avec EC-Pro, de 3 à 6 jours

La durée la plus courte correspond à une très bonne maîtrise des logiciels.

NB : Les résultats de l'analyse sont présentés, bâtiment par bâtiment, dans le rapport d'avancement - phase 3 – mars 2006.

4 RESULTATS DE L'ETUDE (1) : COMPORTEMENT THERMIQUE REEL / SIMULE DU BATI ANCIEN

Dans ce rapport de synthèse nous présentons une analyse globale du comportement thermique du bâti ancien, observé sur notre panel d'étude.

En particulier dans ce chapitre, nous distinguons :

- le comportement d'hiver du bâti ancien (réel et simulé),
- le comportement d'été (réel et simulé),

NB : le chapitre suivant expose les résultats selon une approche systémique (plus « opérationnelle ») : Il présente les particularités du bâti ancien, composante par composante (environnement, enveloppe, etc..

4.1 Comportement thermique d'hiver

4.1.1 Analyse du comportement réel

Les enregistrements effectués pendant la période hivernale ainsi que les questionnaires soumis aux occupants font état d'un confort thermique d'hiver satisfaisant pour la majorité des logements.

Ainsi, en période d'occupation, les températures moyennes intérieures mesurées en période hivernale sont supérieures à 19°C sur tous les logements du panel.

Concernant les consommations énergétiques (chauffage +ECS) réelles (recensées par facture énergétique) : elles sont toutes inférieures à 230 kWh ep / m².an

Si l'on se réfère au classement de performance énergétique des bâtiments (allant d'une échelle de A à I), les bâtiments du panel sont donc classés dans une catégorie de performance énergétique C (91 à 150 kWh ep/ m².an), à D(151 à 230 kWh ep/ m².an).

Le niveau de performance des bâtiments anciens du panel est ici très similaire de celui constaté sur le bâtiment témoin du panel, conforme à la RT2000.

Bâtiment											
Date de construction	1918	1898	18 ^{ème} s.	1755	17 ^{ème} s.	1870	17 ^{ème} s.	17 ^{ème} s.	15 ^{ème} s.	1789	2003
T° moy séjour (en période d'occupation hivernale)	19,8 °C	20,2 °C	18,2 °C	18°C	19,7°C	22°C	19,2°C	19 °C	18 °C	17,5°C	22°C
Sources d'énergie	Chaudière individuelle gaz	Chaudière individuelle fuel	Chaudière individuelle gaz	Chaudière individuelle fuel	Chaudière individuelle gaz	Chauffage électrique + poêle bois	Chaudière individuelle gaz + chem. bois	Chaudière individuelle gaz + chem. bois	Chaudière individuelle fuel+ chem. bois	Chaudière individuelle fuel+ chem. bois	Chaudière collective gaz
Consommation réelle exprimée en KWh ep/ m².an (chauffage + ECS)	110	112	160	107	205	227	120	187	183	162	110
Classification DPE correspondante											

Bâtiment économe

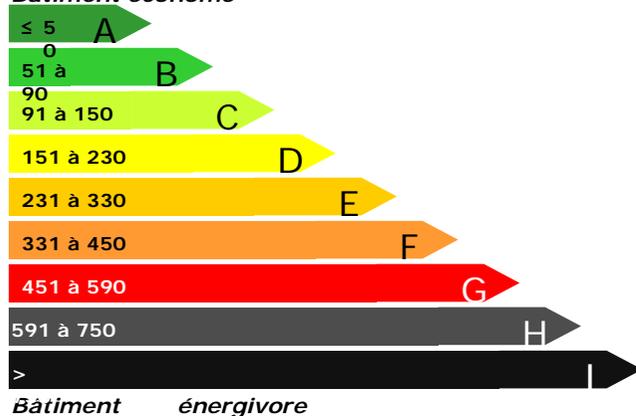


Figure 8 : Synthèse des performances énergétiques réelles des bâtiments diagnostiqués

4.1.2 Simulations effectuées

4.1.2.1 Sous 3CL

Le tableau ci-dessous présente les résultats des simulations effectuées sous 3CL versions 11 et 14.

Grandeur	Unité	Logements collectifs anciens					Logements individuels anciens					Témoïn
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
Surf. Hab	m ²	88	190	92	126	48	150	290	164	170	142	41
C (réelle)	kWh/ep/m ² .an	110	112	160	107	205	227	120	187	183	162	110
C (3CL v11)	kWh/ep/m ² .an	400	400	400	680	400	400	250	340	300	250	300
Écart relatif / C (réelle)	%	264%	257%	150%	536%	95%	76%	108%	82%	64%	54%	173%
C (3CL v14)	kWh/ep/m ² .an	370	553	461	457	403	597	226	340	281	237	261
Écart relatif / C (réelle)	%	236%	394%	188%	327%	97%	163%	88%	82%	54%	46%	137%

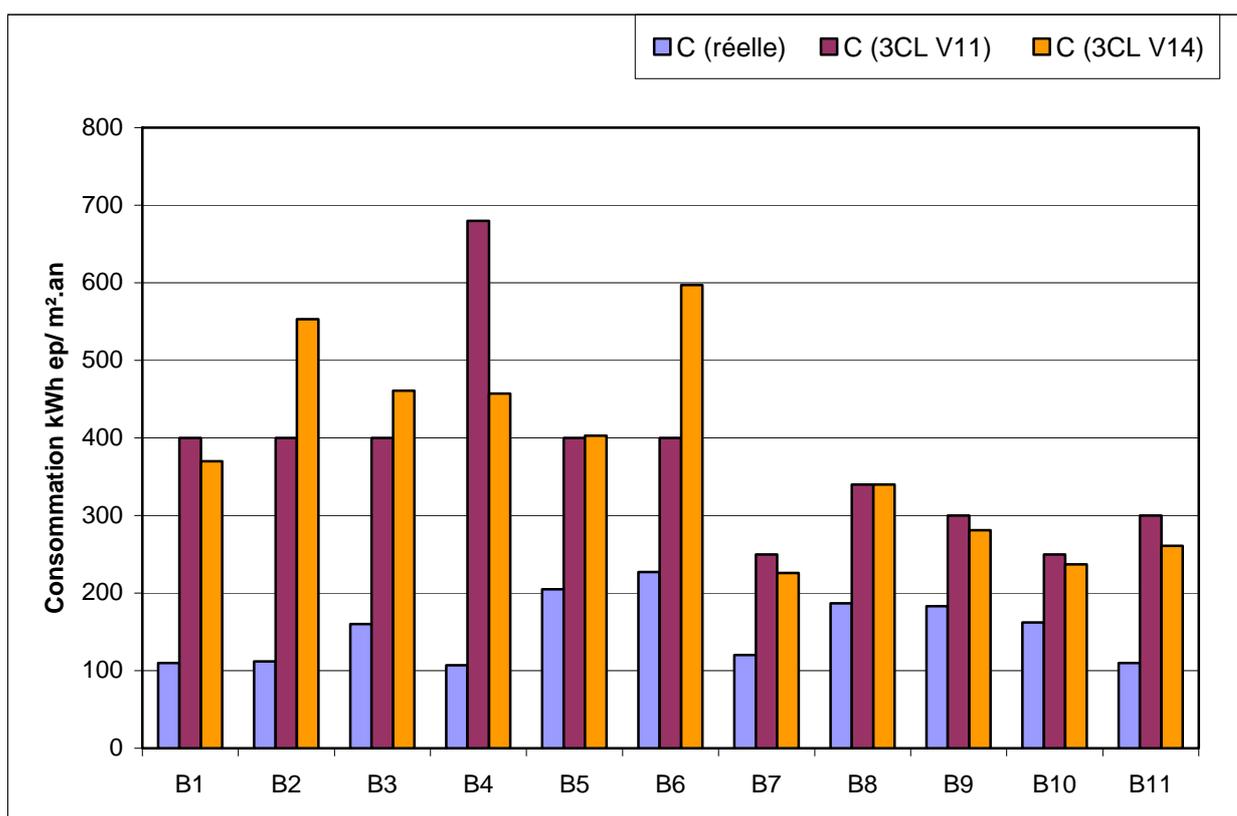


Figure 9 : Comparaison des consommations réelles et des consommations simulées sous 3CL

Les consommations théoriques des logements calculés sous l'outil 3CL présentent des écarts importants par rapport aux consommations réelles :

- pour les logements collectifs anciens (B1 à B5), les consommations estimées par 3CL peuvent présenter un écart relatif de plus de 500% par rapport aux consommations réelles.
- pour les logements individuels (B6 à B10), les consommations estimées par 3CL peuvent présenter un écart relatif de 150% par rapport aux consommations réelles.

4.1.2.2 Sous ClimaWin (méthode réglementaire RT2000)

Le tableau ci-dessous présente les résultats des simulations effectuées sous ClimaWin. Au sens de la RT200, nous calculons ici le coefficient C réf (correspondant aux données de référence de la réglementation, appliquées au bâtiment considéré) et le coefficient C projet (correspondants aux données propres du bâtiment considéré).

		Logements collectifs anciens					Logements individuels anciens					Témoin
Grandeur	Unité	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
Surf. Hab	m ²	88	190	92	126	48	150	290	164	170	142	41
C (réelle)	kWh _{ep} /m ² .an	110	112	160	107	205	227	120	187	183	162	110
C (projet)	kWh _{ep} /m ² .an	492	297	496	426	597	782	340	314	360	335	154
Écart relatif / C (réelle)	%	347%	165%	210%	298%	191%	244%	183%	68%	97%	107%	40%
C (ref)	kWh _{ep} /m ² .an	174	131	175	209	183	300	122	100	151	175	137
Écart relatif / C (réelle)	%	58%	17%	9%	95%	11%	32%	2%	47%	17%	8%	25%

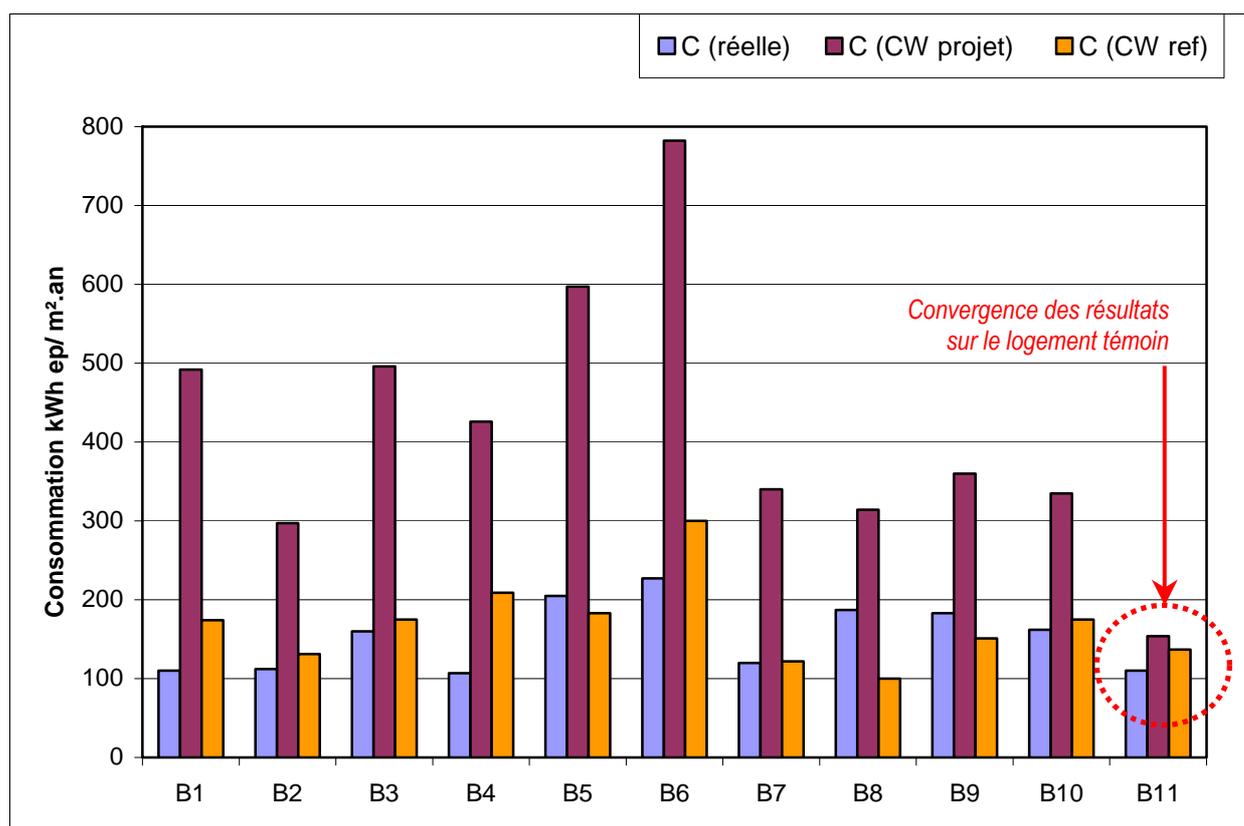


Figure 10 : Comparaison des consommations réelles et des consommations simulées sous ClimaWin

Sur les logements anciens du panel, nous pouvons constater que les coefficients C(projet) calculés sous ClimaWin sont éloignés des consommations réelles (écart relatif pouvant dépasser 300%)

A l'inverse, nous pouvons constater une certaine fidélité de modélisation pour le logement « témoin » (RT2000) : nous observons ici une convergence des 3 grandeurs : C(réelle), C(réf) et C(projet).

4.1.2.3 Sous EcPro

Le tableau ci-dessous présente les résultats des simulations effectuées sous EcPro.

		Logements collectifs anciens					Logements individuels anciens					Témoin
Grandeur	Unité	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
Surf. Hab	m ²	88	190	92	126	48	150	290	164	170	142	41
C (réelle)	kWh _{ep} /m ² .an	110	112	160	107	205	227	120	187	183	162	110
C (ECpro)	kWh _{ep} /m ² .an	279	266	250	227	281	326	181	128	151	175	137
Écart relatif / C (réelle)	%	154%	138%	56%	112%	37%	44%	51%	32%	17%	8%	25%

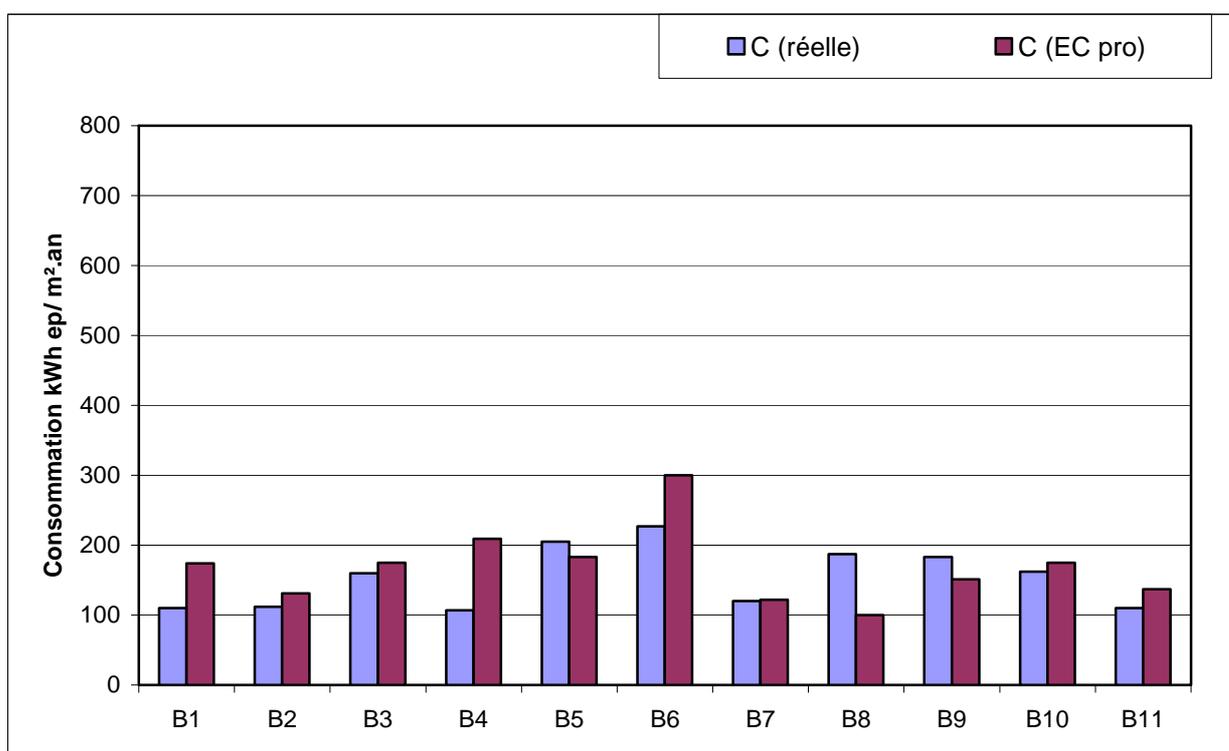


Figure 11 : Comparaison des consommations réelles et des consommations simulées sous ECPro

Nous pouvons constater ici que les courbes de consommations réelles et simulées sont relativement proches, notamment dans le cas des maisons individuelles (bâtiment 6 à 11).

4.1.2.4 Analyse d'ensemble

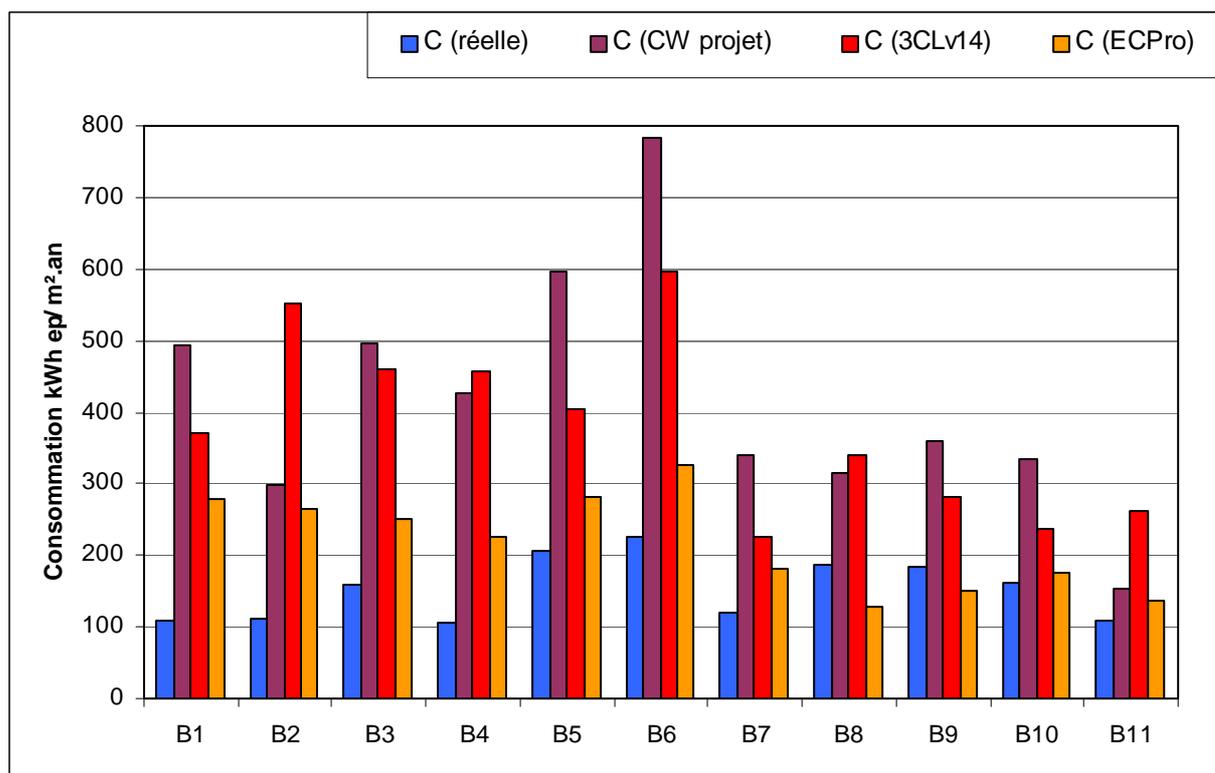


Figure 12 : Comparaison synthétique des consommations réelles et des consommations simulées sous les différents logiciels

D'une façon générale, il convient de noter, pour tous les bâtiments anciens du panel, **l'écart important entre les consommations réelles et les consommations simulées.**

- Pour les logements collectifs anciens (B1 à B5) : l'écart est particulièrement fort puisque les valeurs simulées sous 3CL et sous ClimaWin présentent un écart relatif de 350% en moyenne par rapport aux consommations réelles
- Pour les maisons individuelles anciennes (B6 à B10) : l'écart relatif est moindre ; il atteint tout de même 90% en moyenne pour 3CL et 140% en moyenne pour ClimaWin.

A l'inverse, pour le logement témoin, les consommations calculées sous la méthode réglementaire ClimaWin se rapprochent beaucoup plus des consommations réelles.

Cette **difficulté générale de modélisation du comportement des bâtiments anciens** peut s'expliquer par plusieurs phénomènes.

- En premier lieu, les modèles de calcul utilisés reposent sur un **régime stationnaire**. Or, si cette simplification des calculs est acceptable pour un bâtiment récent (« isolé » et dont on montre par ailleurs que le comportement est relativement stable et peu sensible aux variations extérieures), elle est beaucoup plus discutable pour des bâtiments anciens dont le comportement thermique est, à l'inverse, dynamique et en forte corrélation avec les variations extérieures (cf. paragraphe 5.1 « L'environnement et l'implantation »).
- En second lieu, les modèles de calcul utilisés présentent **certain managements quant à la prise en compte des nombreuses caractéristiques spécifiques du bâti ancien** : celles-ci concernent tout autant les modes constructifs que l'organisation spatiale, les modes d'occupation et de chauffage ou encore les propriétés particulières des matériaux anciens (dont l'inertie).

Nous présentons les difficultés particulières de saisies des différents logiciels dans le chapitre suivant (approche détaillée par composante des bâtiments).

4.2 Comportement thermique d'été

4.2.1 Analyse du comportement réel

Les questionnaires soumis aux occupants et les enregistrements de température in situ nous montrent un comportement thermique d'été des bâtiments globalement satisfaisant.

Le graphique ci-dessous présente, en période estivale, les valeurs maximales de température extérieure (sous abri) et de température résultante intérieure (prise dans le séjour) pour les bâtiments du panel. Nous pouvons constater des écarts de température favorables au confort intérieur (soit : $T(\text{int}) \text{ max} < T(\text{ext}) \text{ max}$) sur l'ensemble du panel. Ainsi, l'écart entre la température extérieure maximale et la température résultante intérieure maximale peut avoisiner 7°C sur certains bâtiments anciens du panel (B4, B6, B8 ou B9), permettant de maintenir un confort intérieur satisfaisant même en période de fortes chaleurs.

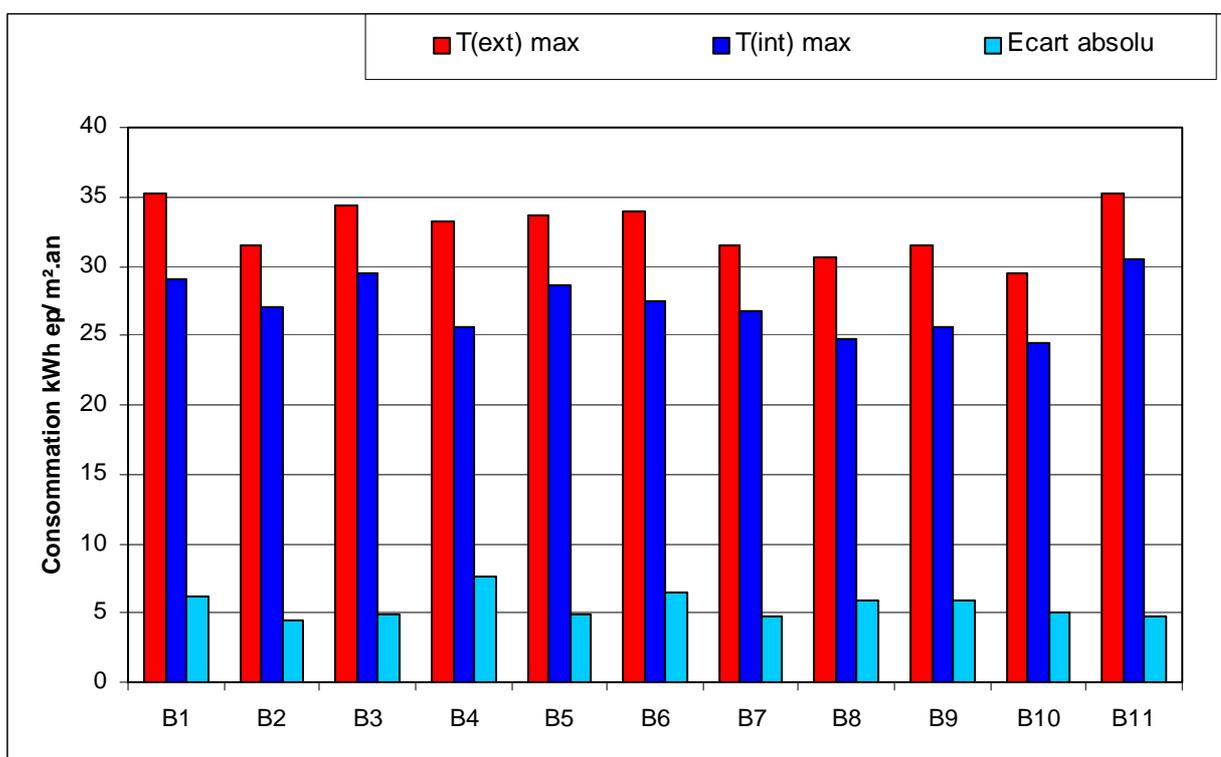


Figure 13 : Comportement thermique d'été in situ : comparaison des températures extérieures maximales et intérieures maximales pour les différents bâtiments du panel.

Ce comportement thermique d'été s'explique globalement par une gestion optimisée du bâtiment, combinant une réduction des apports solaires en journée et un rafraîchissement passif nocturne.

Cette gestion étant possible grâce aux éléments suivants, observés sur différents bâtiments anciens du panel :

- Des masques solaires sur les façades exposées,
- Des ratios d'ouvertures relativement faibles,
- Une transversalité systématique du plan, permettant une ventilation naturelle par tirage thermique,
- Une très forte inertie intérieure du fait de l'emploi de modes constructifs lourds, tant pour les éléments verticaux (refends et façades en pierre d'épaisseur allant de 40 à 80cm sur certains bâtiments) que pour les planchers.

Ces caractéristiques sont détaillées dans le chapitre suivant, par composante du bâtiment.

4.2.2 Simulations effectuées

Parmi les logiciels utilisés, seul « ClimaWin » permet de simuler le comportement d'été d'un bâtiment. L'approche se fait par le calcul de la température intérieure conventionnelle d'été (référence et projet). Appelé Tic, cet indicateur représente la valeur maximale de la température résultante intérieure du bâtiment, en période estivale.

Le graphique ci-dessous présente, pour les 11 bâtiments de l'étude, les températures conventionnelles simulées et les températures résultantes maximales enregistrées in situ, pendant la saison estivale.

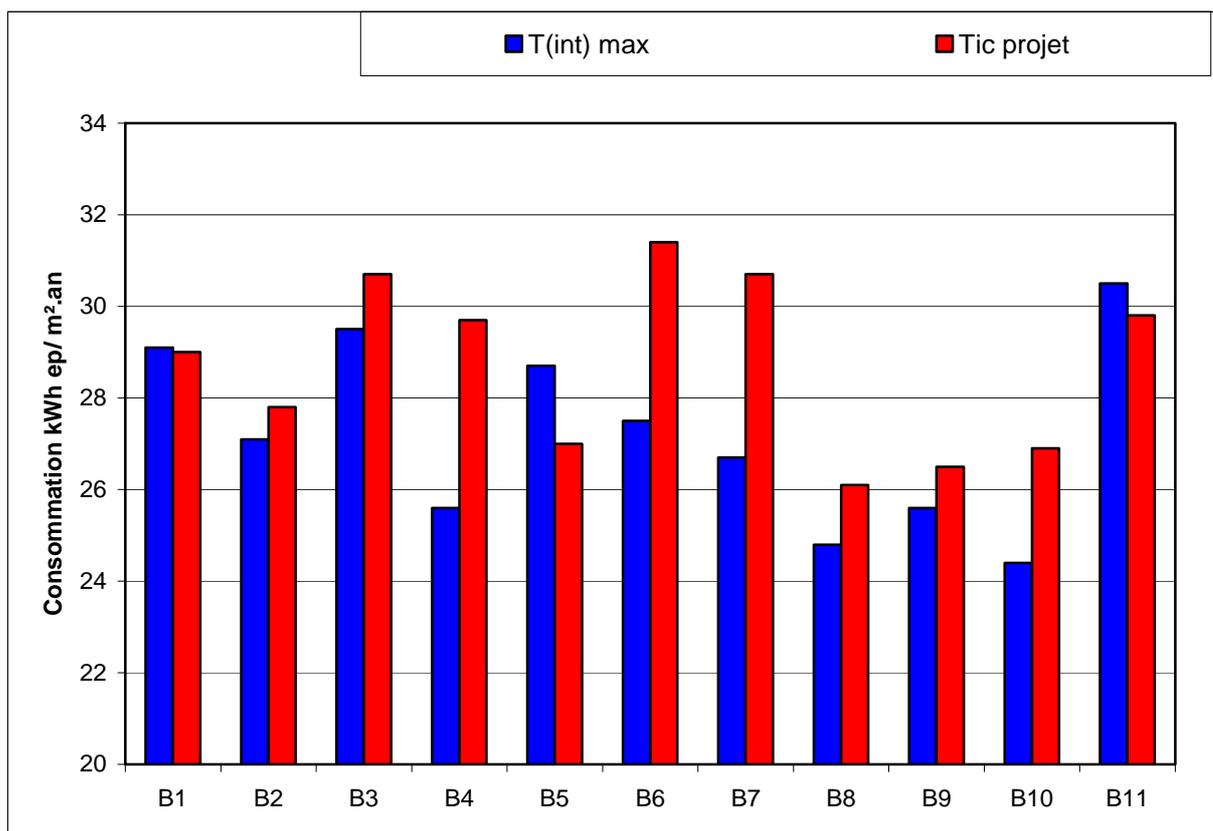


Figure 14 : Comparaison des valeurs de Tic simulée et de la température résultante intérieure maximale mesurée in situ, pour chacun des bâtiments du panel.

Comme pour le comportement d'hiver, nous pouvons constater sur ce graphique des écarts importants entre les valeurs simulées et les valeurs réelles.

Les bâtiments 4, 6, 7, 8, 9 et 10 en particulier, possédant une inertie très importante due notamment à des parois verticales massives, présentent ainsi des performances réelles supérieures aux simulations.

5 RESULTATS DE L'ETUDE (2) : MISE EN EVIDENCE DES SPECIFICITES DU BATI ANCIEN

L'étude de chaque spécimen du panel fait apparaître des caractéristiques propres (*cf. rapport d'avancement phase 2 : analyse individuelle des bâtiments*), qu'il convient de mettre en évidence lors de tout diagnostic et avant toute réhabilitation.

Toutefois, des tendances apparaissent, qui distinguent fortement le bâti ancien des constructions modernes.

Dans ce chapitre, nous présentons globalement ces spécificités, en distinguant les **systèmes** suivants :

- L'environnement et l'implantation
- L'organisation intérieure
- Le mode constructif
- L'enveloppe (parois opaques)
- Les ouvertures
- Les équipements
- Les occupants

Chaque paragraphe est organisé de la manière suivante :

- 1. Description générale du système considéré (caractérisation, définitions)**
- 2. Spécificités du bâti ancien pour ce système (recensées sur le panel)**
- 3. Prise en compte de ces spécificités dans les méthodes de calcul**
- 4. Précautions éventuelles à prendre lors de réhabilitation**

5.1 L'environnement et l'implantation

5.1.1 Description générale

L'environnement est le premier système intervenant dans la conception d'un bâtiment. L'implantation du bâti ancien dans son milieu proche se préoccupait généralement des caractéristiques suivantes :

- Le climat local (vents, températures, précipitations, ensoleillement, altitude, zone de montagne ou de littoral, zone urbaine ou rurale, etc...)
- Le relief proche (falaise, contre-terrier, etc.)
- Les masques (autres bâtiments, végétation persistante ou non,...)
- L'environnement construit et la mitoyenneté.

En pratique, selon que le bâtiment considéré ait bénéficié ou non d'une démarche de conception dite « bioclimatique », ces paramètres ont une influence plus ou moins forte sur son comportement thermique.

5.1.2 Spécificités du bâti ancien

Concernant les bâtiments anciens étudiés dans le panel, l'analyse révèle globalement **une forte prise en compte de l'environnement dans la conception du bâtiment.**

Les caractéristiques d'implantation du bâti ancien peuvent être distinguées selon le milieu considéré (urbain ou rural, zone climatique).

▪ Spécificités de l'environnement urbain « ancien »

En milieu urbain ancien, la forme la plus courante est celle de l'îlot fermé, qui s'est développé dans les villes françaises sous l'influence haussmannienne.

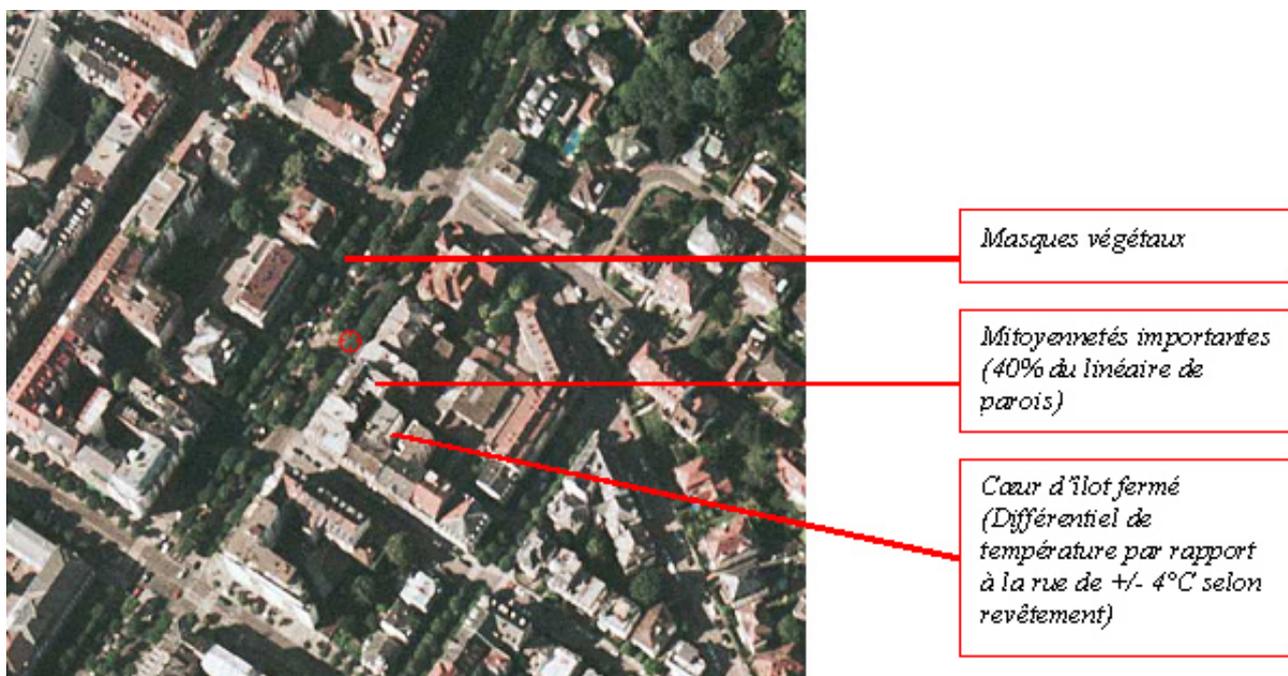


Figure 15 : Vue aérienne d'un îlot urbain haussmannien caractéristique (cas du bâtiment 2)

Cette forme urbaine présente plusieurs caractéristiques ayant des conséquences sur le comportement thermique du bâtiment :

- Des masques bâtis ou végétaux.

Les allées plantées (feuillage caduc) des avenues haussmanniennes limitent les apports solaires en été, du moins pour les étages inférieurs.

- *Une mitoyenneté des pignons importante.*

Cette mitoyenneté des constructions permet de réduire les surfaces déperditives du logement.

- *Une distinction climatique entre la rue et le cœur d'îlot.*

Des écarts de température sensibles (+ ou- 4°C) sont observés entre ces deux faces de l'immeuble.

Si le revêtement intérieur de l'îlot est de type minéral, des phénomènes « d'îlot de chaleur » peuvent être constatés et nuisent au confort d'été du bâtiment.

A l'inverse, des cœurs d'îlot végétalisés sont source de fraîcheur et permettent un rafraîchissement naturel des logements.

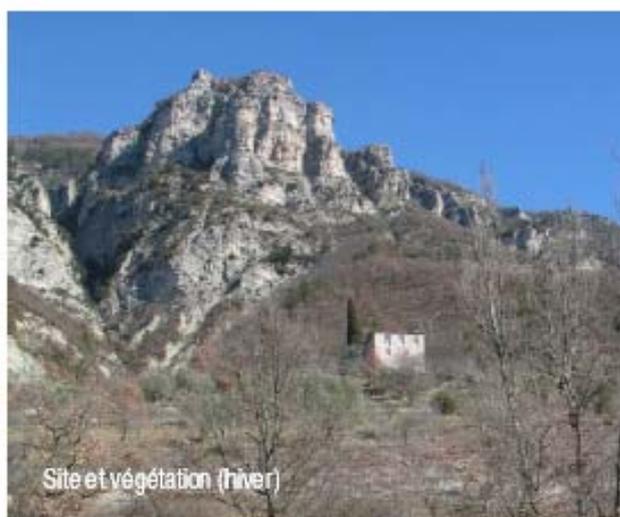
▪ **Spécificités de l'environnement rural**

En milieu rural, l'implantation du bâti ancien tend généralement à optimiser les apports solaires et à réduire les déperditions : façade principale orientée sud, dos au vent dominant, utilisation de la végétation pour créer des masques en été, etc.

L'exemple ci-dessous (bâtiment 7 du panel) illustre ces principes d'implantation dans l'environnement.



Site et végétation (été)



Site et végétation (hiver)

Figure 16 : photos de la façade Sud en été et en hiver (emploi d'une végétation à feuillage caduc)

Figure 17 : coupe Sud – Nord sur le bâtiment et caractéristiques d'implantation.



<p>Façade Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aucun masque proche - Végétation caduque 	<p>Implantation du bâtiment :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Implantation en terrasse couvrant la moitié inférieure de la façade Nord - La partie supérieure de la façade Nord est protégée par un volume tampon (constitué par un débarras) 	<p>Façade Nord :</p> <p>Protection au vent constitué par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le relief - la végétation persistante
---	--	---

Les mesures effectuées in situ confirment la forte dépendance **du bâti ancien vis-à-vis de son environnement**.

Le graphique ci-dessous nous présente les coefficients de corrélation linéaire entre les températures intérieures et extérieures des logements, calculés sur une période de mi-saison, pendant laquelle la variable chauffage n'intervient pas.

Nous pouvons alors constater que le comportement thermique des bâtiments anciens est largement dépendant des conditions climatiques extérieures : le coefficient de corrélation est en moyenne de 60% sur les logements anciens du panel. Ce coefficient traduit dans une certaine mesure le phénomène suivant : les températures intérieures suivent les évolutions du contexte extérieur (chaleur, rafraîchissement, ...), avec un certain déphasage en amplitude et en temps.

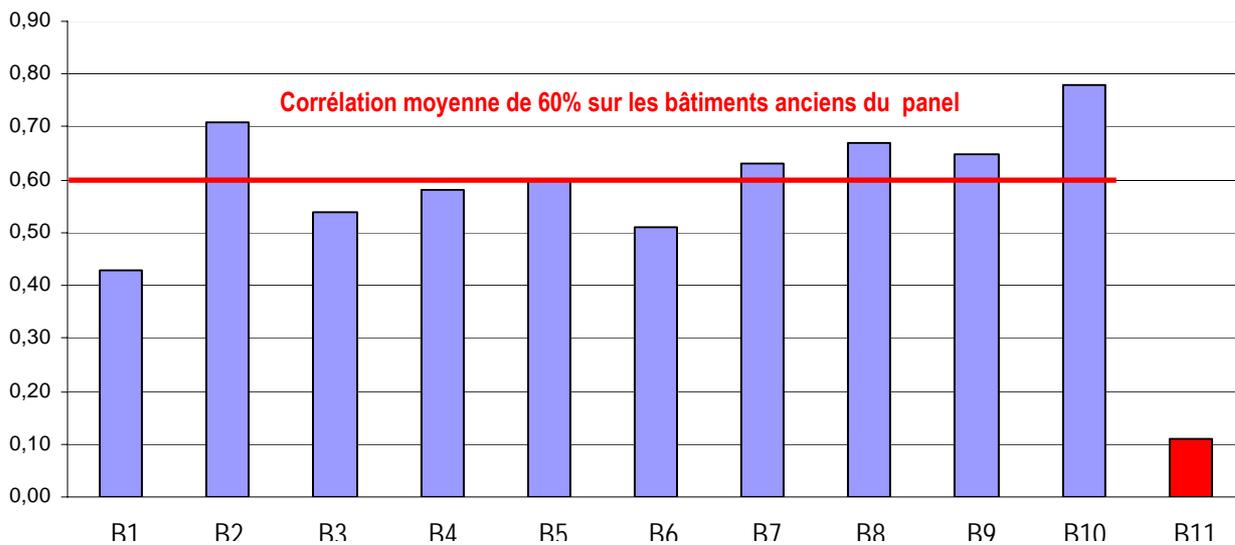


Figure 18 : Analyse de la dépendance du comportement thermique des bâtiments vis-à-vis du contexte extérieur : coefficients de corrélation linéaire entre $T(int)$ et $T(ext)$, en période de mi-saison (comportement libre, sans la variable chauffage)

Bien plus sensibles que les logements contemporains (conçus généralement comme un système fermé, où les échanges avec l'extérieur sont contrôlés artificiellement), **le bâti ancien apparaît donc très dépendant de l'environnement proche. Il est conçu comme un « système respirant »**. Son enveloppe (cf. aussi paragraphe 5.3) est généralement « perméable » échangeant air, et humidité, recevant et régulant les apports solaires.

A l'inverse, les logements neufs (cas du bâtiment 11) apparaissent comme des boîtes plus étanches, imperméables et ventilées artificiellement, et donc beaucoup moins sensibles au contexte extérieur.

5.1.3 Prise en compte de ces spécificités dans les méthodes de calcul

Compte tenu de l'influence importante du contexte local sur le comportement thermique du bâti ancien, il convient de s'interroger sur la prise en compte effective, par les logiciels, des caractéristiques du milieu.

5.1.3.1 Logiciel 3CL

▪ *Logements collectifs (B1 à B5)*

- L'implantation du logement est renseignée seulement avec le département, et par sa position en étage, sur un plan de coupe. L'orientation du logement (sauf indication des vitrages sud dégagés) et les conditions thermiques aux limites ne sont pas demandées par 3CL. Les mitoyennetés des parois horizontales et verticales, avec des espaces chauffés ou non chauffés, ne peuvent pas être décrites précisément avec 3CL. Les échanges entre les logements au sein de l'immeuble ne sont pas renseignés.

- Le logement ou la partie de logement (B4) ne correspond pas toujours à une zone thermique homogène: espaces chauffés et non chauffés contigus, éléments constructifs répartis de façon hétérogène, composition variable des parois verticales et/ou horizontales (matériaux, vétusté), idem pour les murs de façades avec des orientations différentes pour un même logement, des masques solaires variables (végétation), une occupation du logement parfois très variable, des équipements (chaudière) situés hors du logement.

- L'exposition du logement aux accidents aérauliques, en milieu bâti, n'est pas renseignée avec 3CL: cours intérieurs (B2, B3, B4, B5), îlot de chaleur, rues encaissées, coteau au-dessus de la Loire, terrasse et falaise à proximité (B4), serre à proximité (B5), porche sous le logement (B5).

▪ *Maisons individuelles (B6 à B11)*

En plus des observations ci-dessus, nous pouvons ajouter les remarques suivantes :

- L'orientation de la maison (sauf indication des vitrages sud dégagés) n'est pas demandée.

- L'exposition particulière aux accidents aérauliques ne peut pas être renseignée: implantations semi-enterrées (B7, B10), coteau surplombant un marais (B10)

5.1.3.2 Logiciel ClimaWin

▪ *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Les caractéristiques de l'environnement et de l'implantation du logement sont saisies sur les bases de la RT2000.

- Les variétés géométriques des logements (B1, B2, B3, B4) nécessitent une bonne connaissance du logiciel CW, et une saisie importante et longue qui peut durer plusieurs jours. - Les plans fournis conduisent souvent à les redessiner entièrement afin de simplifier la saisie de chaque logement ancien avec CW (vérification et reprise des cotations).

▪ *Maisons individuelles (B6 à B11)*

En plus des observations ci-dessus, nous pouvons remarquer que les caractéristiques de l'environnement et de l'implantation d'une maison sont saisies sur les bases de la RT2000. Cependant l'implantation semi-enterrée est difficile à saisir avec CW. Les données climatiques saisies correspondent à celles demandées par la RT2000.

5.1.3.3 Logiciel EPro

▪ *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Les données saisies sont similaires à celles saisies avec CW, mais la saisie est plus rapide.

- La seule zone climatique disponible avec cette version prototype EPro correspond aux données climatiques de Macon (type H1). Les spécificités du climat local ne sont pas précisées.

- Le plancher sur le porche (B5) ne peut pas être saisi avec précision.

▪ *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- ECPro a été développé initialement pour l'étude de maisons individuelles. L'environnement et l'implantation sont prises en compte sans difficultés particulières, la saisie est plus rapide que celle de CW.
- La seule zone climatique disponible avec cette version prototype ECPro correspond aux données climatiques de Macon (type H1).

5.1.4 Précautions à prendre lors de réhabilitation

Au regard de la grande dépendance du bâti ancien vis à vis de son environnement, il apparaît nécessaire de bien appréhender ses caractéristiques. Bien plus que la simple considération d'une zone climatique, ce sont toutes les spécificités du contexte local qu'il s'agit de considérer lors du diagnostic :

- masques bâtis ou végétaux
- caractéristiques climatiques locales (ensoleillement, vents dominants,...)
- Mitoyenneté et implantation du bâtiment.
- Etc.

La modification à priori anodine d'un élément environnant du bâtiment (exemple : minéralisation d'une cour) peut entraîner des effets importants sur le comportement thermique du bâtiment (suppression du potentiel de rafraîchissement nocturne du logement).

5.2 L'organisation des espaces intérieurs (la distribution)

5.2.1 Description générale

En matière de bioclimatique, l'organisation intérieure du bâtiment est un système important.

Elle doit favoriser le comportement thermique du bâtiment (hiver comme été), en jouant sur les caractéristiques suivantes :

- orientation des espaces,
- mode de distribution (plan traversant ou non),
- emplacement et disposition des pièces selon leur utilisation.
- etc.

5.2.2 Spécificités du bâti ancien

Dans le cas des bâtiments étudiés, et en l'absence de moyens de chauffage performants existants lors de la conception, l'organisation interne tend généralement à favoriser le confort intérieur (été comme hiver). *Remarquons notamment les propriétés suivantes, constatées sur plusieurs bâtiments de l'étude :*

• L'emplacement des pièces :

L'organisation la plus souvent observée sur les logements du panel consiste en une distinction des « pièces de vie » et des « pièces de service ». Celles-ci tendent à être disposées en fonction de la course du soleil :

- Pièces de vie, côté ensoleillé.
- Pièces de service, côté froid.

• Les espaces tampons :

Arrières-cuisines, caves, celliers, combles, etc. constituent autant d'espaces annexes des logements anciens qui, sur le plan thermique, constituent des zones tempérées limitant les transferts de chaleur avec l'extérieur.

• Des logements traversants :

La plupart des logements anciens, qu'ils se situent en milieu urbain ou rural, sont traversants. En effet, en l'absence de moyens artificiels, la ventilation des logements devait se faire de façon naturelle.

Aussi, la transversalité du plan du logement permettait de créer un flux d'air efficace pour renouveler et / ou rafraîchir l'air du logement.

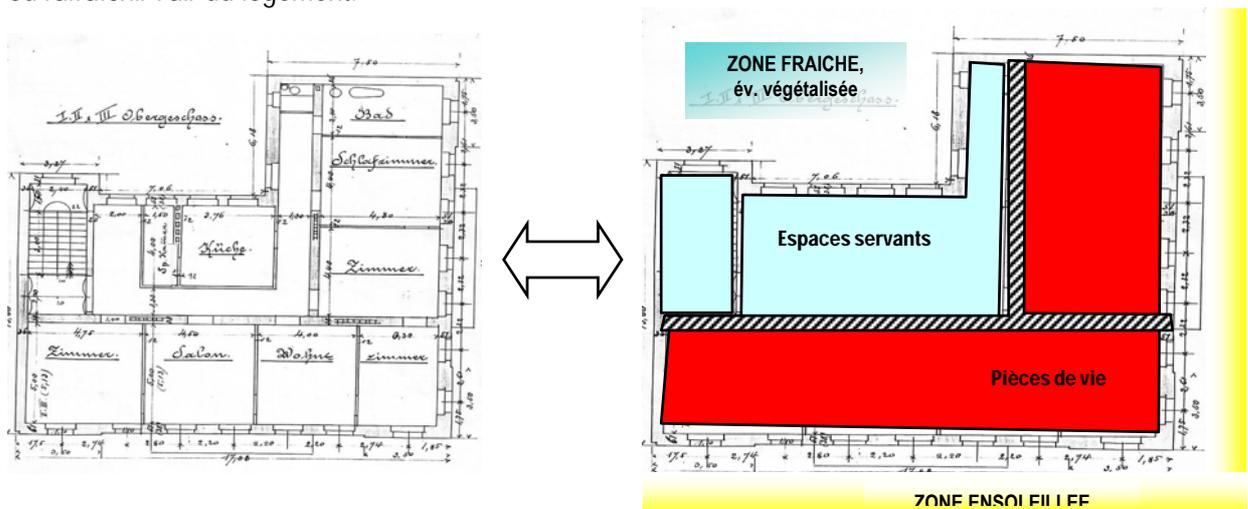


Figure 19 : Analyse de l'organisation intérieure du bâtiment 2 : plan traversant, refend intérieur en briques ($e=50\text{cm}$), emplacement des pièces de vie sur rue (zone ensoleillée), des pièces de service sur cour.

5.2.3 Prise en compte de ces spécificités dans les méthodes de calcul

5.2.3.1 Logiciel 3CL

▪ *Logements collectifs (B1 à B5)*

- L'organisation des espaces intérieurs, et la cohérence entre l'organisation intérieure et extérieure, ne sont pas saisies.
- L'orientation, l'emplacement des pièces principales, les espaces tampons (espaces chauffés et non chauffés) ne sont pas saisies.
- La présence d'espaces non chauffés au milieu du logement n'est pas saisie (cages d'escaliers ou halls d'entrée B1, B2, B3 et B4).
- Les diversités géométriques des logements anciens ne sont pas pris en compte: logement traversant (B5) ou d'angle (B2, B5).

▪ *Maisons individuelles (B6 à B11)*

En plus des observations ci-dessus, nous pouvons ajouter les remarques suivantes :

- La forme de l'emprise au sol (configuration de la maison) est saisie sans précision de l'orientation.
- L'orientation et la situation des espaces non chauffés ne sont pas saisies avec 3CL.

5.2.3.2 Logiciel ClimaWin

▪ *Logements collectifs (B1 à B5)*

- La caractérisation des espaces chauffés et des espaces non chauffés ainsi que la saisie des différentes parois entre ces espaces, permettant de faire les calculs de la RT2000, est possible. Cependant, cette saisie peut demandée plusieurs jours (plans redessinés et cotations vérifiées, multiplication de parois composites aux épaisseurs variables, définition des espaces chauffés et des espaces non chauffés).
- La cohérence entre l'organisation intérieure et extérieure n'est pas vérifiée par le logiciel.

▪ *Maisons individuelles (B6 à B11)*

En plus des observations ci-dessus, nous pouvons ajouter les remarques suivantes :

- La saisie des différentes parois, permettant de faire les calculs de la RT2000, fournit les données principales relatives à la distribution de la maison.
- La répartition des espaces non chauffés et l'implantation contre terrier rendent plus difficile la saisie avec CW.

5.2.3.3 Logiciel ECPro

▪ *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Par défaut, il y a une zone chauffée et la possibilité de créer des zones non chauffées.
- Le rez-de-chaussée du bâtiment B4 est difficile à saisir, l'homogénéité de la zone thermique correspondante n'est pas assurée.

▪ *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- La géométrie particulière des combles du bâtiment B6 ne permet pas une saisie précise.
- Les différentes zones thermiques du bâtiment B7 ne peuvent pas être toutes prises en compte.
- Pour les autres bâtiments, la saisie des différentes parois limitant quelques zones thermiques fournit les principales données relatives à la distribution des bâtiments.

5.2.4 Précautions à prendre lors de réhabilitation

Toute pièce ou partie d'un logement ancien possède une fonction bien déterminée et qui est généralement liée à sa disposition vis-à-vis du contexte extérieur.

Ainsi, d'un point de vue thermique, les logements anciens présentent une certaine cohérence, qu'il ne faut pas perturber lors de réaménagements internes. Certaines précautions sont alors à prendre :

- Appréhender l'organisation initiale du logement (emplacement des pièces, ensoleillement, mode de chauffage,...)
- A partir de cette organisation initiale, éviter de créer des pièces à « contre usage » (exemple : aménagement d'une pièce tampon du logement en une pièce de vie).

5.3 Le mode constructif

5.3.1 Description générale

Les modes constructifs anciens sont très divers : selon la région, le climat, les techniques et les procédés locaux. Ils apportent tous une réponse spécifique aux exigences climatiques locales.

Nous présentons ici ;

- les dispositifs d'ensemble recensés,
- des dispositifs constructifs particuliers, favorisant notamment le comportement thermique d'hiver.

5.3.2 Spécificités du bâti ancien

D'une manière générale, nous pouvons constater :

- **Des bâtiments compacts**

Ces formes compactes limitent naturellement les surfaces d'échange avec l'extérieur et favorisent donc le comportement d'hiver.

- **Des bâtiments à structure lourde**

Le système structural du bâti ancien multiplie généralement les éléments porteurs, lourds :

- Des maçonneries porteuses lourdes ayant une forte inertie thermique, répartie entre façades et refends intérieurs
- Des planchers en bois relativement isolants lorsqu'ils sont complets avec plafonds en plâtre sur lattis
- Des matériaux de remplissage de ces planchers très performants comme régulateurs hygrothermiques (plâtras, sables, scories de hauts fourneaux, etc.),

- **Des dispositions constructives particulières : cas des liaisons planchers - façade**

En plus des caractéristiques d'ensemble énumérées précédemment, les bâtiments du panel présentent des détails constructifs particuliers qu'il convient de souligner. La figure ci-dessous illustre le principe de liaison plancher – façade que l'on rencontre couramment dans les bâtiments anciens.

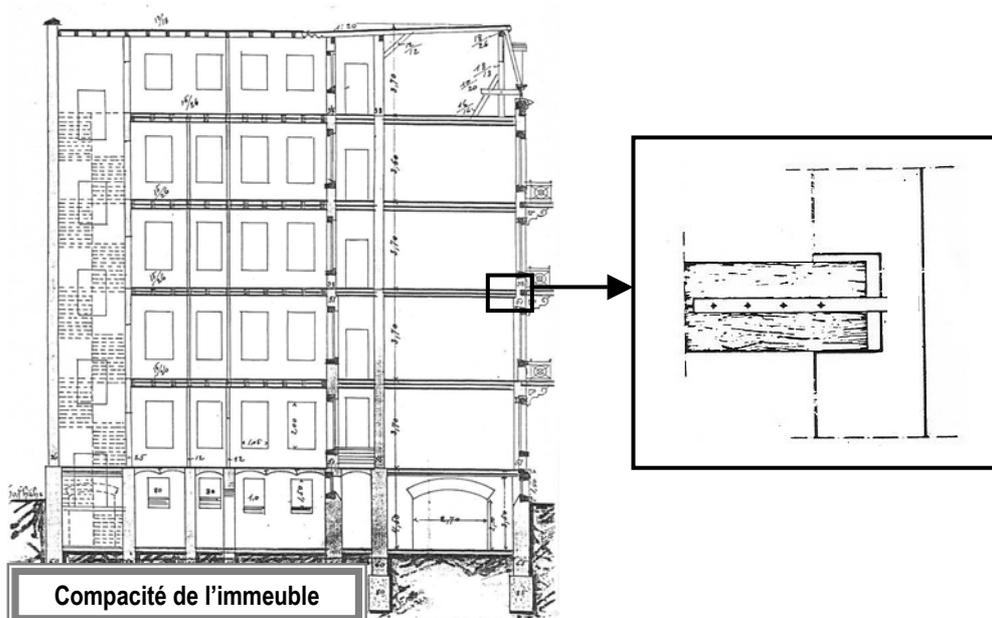


Figure 20 : Coupe générale et de détail sur la liaison plancher – façade du bâtiment 2

Dans le bâti ancien, les repos des abouts de poutres, en bois ou en fer, sont généralement réalisés en aménageant des espaces libres (niches) autour de ces pièces de structure ; ceci afin d'éviter le pourrissement du bois ou la rouille du fer au contact des maçonneries.

D'un point de vue thermique, cette discontinuité des structures limite considérablement les échanges par conduction entre le plancher et la façade (cf. figure 21)

Si, de plus, la sous face du plancher est recouverte d'un enduit de plâtre, un caisson d'air très faiblement ventilé est constitué. Ce dernier limite alors les échanges thermiques par convection, au niveau de la liaison plancher – façade. (Cf. figure 22).

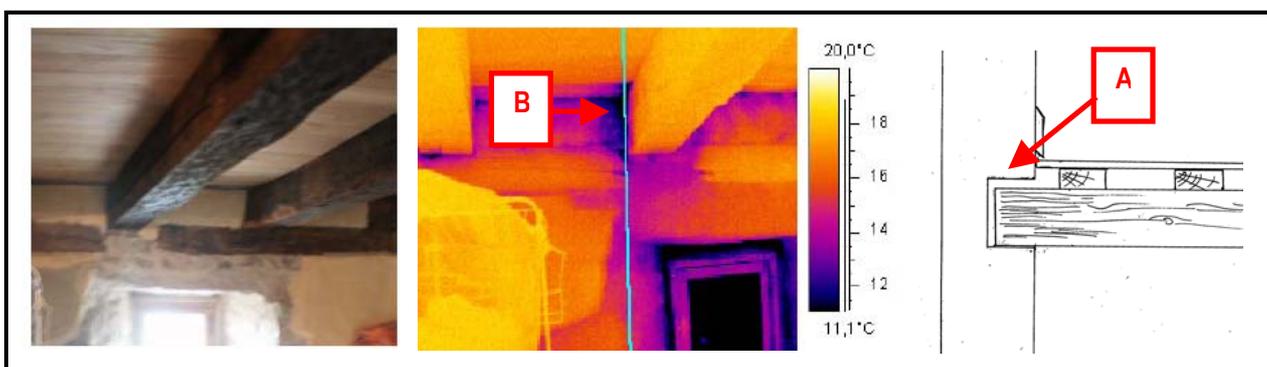


Figure 21 : cas d'un plancher simple à poutres encastrées apparentes (bâtiment 7)

Nous observons ici les propriétés suivantes :

A : Réduction des échanges thermiques par conduction (discontinuité des structures plancher - façade) ;

B : Échanges thermiques par convection dans les niches des poutres ventilées, visibles par thermographie infrarouge.



Figure 22 : cas d'un plancher complet : poutres encastrées, enfermées dans un caisson en plâtre (bâtiment 3)

Nous observons ici les propriétés suivantes :

A : Réduction des échanges thermiques par conduction : discontinuité des structures plancher - façade

B : Réduction des échanges thermiques par convection : présence d'une lame d'air faiblement ventilée.

Dans ce dernier cas, les dispositions constructives particulières du bâtiment ancien réduisent tout effet de pont thermique entre la façade et le plancher du bâtiment.

5.3.3 Prise en compte de ces spécificités par les méthodes de calcul

5.3.3.1 Logiciel 3CL.

- *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Certains modes constructifs ne sont pas saisis : planchers utilisant des matériaux de remplissage comme les scories (B1, B2, B5), parois de moellons en pierre de tuffeau, pans de bois, enduits, ardoise naturelle, tuile en terre cuite, briques foraines, présence de lame d'air ventilée autour de certains composants.

- Les caractéristiques des éléments constructifs rencontrés ne peuvent pas toutes être saisies: épaisseurs variables selon les étages, matériaux différents selon les murs/façades, composants multicouches locaux.

- La géométrie atypique d'un élément constructif n'est pas pris en compte.

- *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- Idem ci-dessus.

- Certains modes constructifs ne peuvent pas être saisis comme par exemple : la maçonnerie de pierre de silex, les chaînages verticaux en pierres gréseuses taillées, les liaisons entre cheminée et enveloppe, couverture de chaume, l'enduit chanvre et chaux, les pans de bois traversant et torchis, etc.

5.3.3.2 Logiciel CW.

- *Logements (B1 à B5)*

- Les caractéristiques des ponts thermiques doivent être saisies selon la RT2000. Cependant, des difficultés apparaissent pour décrire et saisir des ponts thermiques spécifiques: jonctions entre plancher bois/façade en briques, liaisons entre cheminée et enveloppe, liaisons entre les éléments constructifs locaux décrits ci-dessus.

- *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- Idem ci-dessus.

- La saisie des modes constructifs spécifiques, notamment en raison des caractéristiques géométriques des différents espaces intérieurs (soubassement, étage), et des propriétés constructives est difficile: maçonnerie de pierre de silex, chaînages verticaux en pierres gréseuses taillées, couverture de chaume, enduit chanvre et chaux, pans de bois traversant et torchis, parquet de bois lourd non jointif, liaisons bois/pierres, pierres de grès harpées, fixation des menuiseries.

5.3.3.3 Logiciel ECPro

- *Logements (B1 à B5)*

- Des composants simples peuvent être définis.

- Les caractéristiques déperditives des ponts thermiques doivent être estimées.

- *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- Idem ci-dessus (logements B1 à B5)

- Les caractéristiques des murs d'épaisseurs variables doivent être estimées.

- La saisie est plus rapide que celle de CW.

5.3.4 Précautions à prendre lors de réhabilitation

Il importe de bien appréhender le mode constructif du bâtiment et d'en comprendre le fonctionnement thermique. Les techniques d'assemblage des structures dans le bâti ancien sont très différentes des techniques contemporaines ; elles font apparaître des dispositifs à respecter lors d'une réhabilitation : notamment concernant les discontinuités entre plancher et façade qui limitent les déperditions thermiques.

5.4 L'enveloppe (parois opaques)

Les enveloppes des bâtiments anciens se montrent très hétérogènes :

- ⇒ entre les régions et modes constructifs locaux,
- ⇒ au sein même d'un bâtiment, tant dans leur composition verticale (exemple dans les pans de bois et torchis sur soubassement de maçonnerie) que dans leur composition horizontale. De nombreux matériaux, pour la plupart d'origine locale, peuvent être mis en œuvre.

Cette diversité engendre des difficultés certaines dans l'appréhension des caractéristiques de l'enveloppe.

5.4.1 Description générale

Nous présentons ici brièvement les principales typologies de parois anciennes, rencontrées sur le panel d'étude :

- maçonnerie de pierre
- maçonnerie de brique
- mur en pan de bois
- mur en terre crue

▪ Maçonnerie en pierre (bâtiment 4,5, 7, 8 et 9)

Les maçonneries en pierre constituent le type de construction le plus utilisé dans le passé en France.

Le bâti ancien en pierres présente une grande diversité de matériaux, car, du fait du coût élevé du transport, les pierres étaient extraites localement. De part leur grande diversité, pierres et mortiers expriment la spécificité de chaque terroir.

▪ Maçonnerie en brique (bâtiment 1,2 et 3)

Les briques sont des matériaux artificiels, fabriqués à partir de l'argile. Jusqu'en 1930, les dimensions des briques pleines n'étaient pas standardisées et variaient d'une région à l'autre. Les appareillages des maçonneries en briques varient en fonction de la région : montage à la picarde, montage à la française, montage à l'anglaise sont les trois mises en œuvre principales, qui connaissent des variantes selon l'épaisseur de l'ouvrage. Le bâti ancien en briques se rencontre dans les régions où des dépôts argileux existent à faible profondeur, et où la pierre est rare.

▪ Pans de bois (bâtiment 5 et 10)

Le bâti ancien en pan de bois est antérieur à la fin du 19^{ème} siècle. Dans les villes, on le rencontre notamment à Rouen, Strasbourg, Colmar, et Paris pour les murs de refend et de façade sur cour. Il repose en principe sur un soubassement en maçonnerie afin de la préserver de l'humidité en provenance du sol.

L'espace entre les pans de bois est constitué par un mélange de produits locaux : terre cuite ou crue, végétaux,...

▪ Murs en terre crue (bâtiment 6)

Ce type de construction se trouve dans de nombreuses régions et notamment dans la région de la montagne de Reims. Les constructions en terre crue présentent généralement un comportement performant en thermique d'été.

5.4.2 Spécificités du bâti ancien

L'analyse de l'enveloppe des bâtiments du panel révèle principalement les caractéristiques suivantes :

- Une importante sensibilité à l'humidité (paragraphe 5.4.2.1)
- Des propriétés thermiques particulières favorables au confort d'été et au confort d'hiver (paragraphe 5.4.2.2)

5.4.2.1 Une importante sensibilité à l'humidité

a) L'équilibre hygrométrique des parois anciennes

Dans les constructions modernes les parois sont généralement étanches. Leurs fondations et les matériaux qui les constituent sont secs et protégés de l'humidité. Les matériaux sont homogènes et juxtaposés.

Dans les constructions anciennes, les parois possèdent souvent une forte sensibilité à l'humidité.

Celle-ci provient essentiellement :

- de la nature même des matériaux employés,
- de dispositifs constructifs spécifiques (comme l'absence de systèmes d'évacuations des eaux pluviales, la présence de l'étage en retrait dans les immeubles haussmanniens, la présence de l'étage en console dans les immeubles à pans de bois....)

Les mesures présentées ci-dessous illustrent sur les différents bâtiments du panel le coefficient de corrélation linéaire entre humidité intérieure et extérieure.

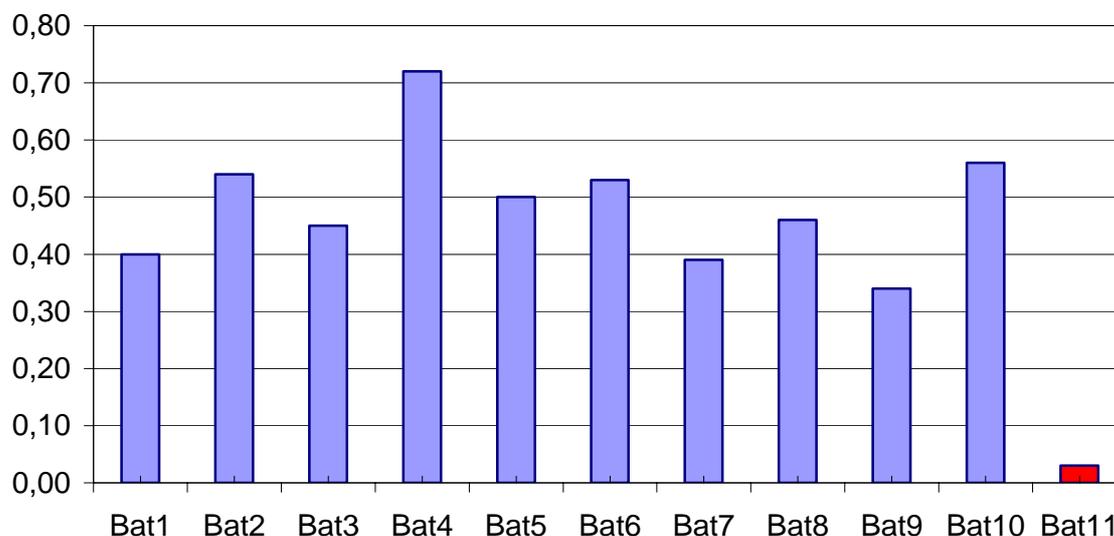


Figure 23 : Coefficients de corrélation linéaire entre humidité intérieure et extérieure, en période de mi-saison, pour chaque bâtiment du panel

La forte corrélation entre l'humidité intérieure et extérieure des bâtiments anciens du panel met en évidence la sensibilité de ces constructions vis à vis de l'humidité et l'importance du phénomène de respiration pour ces bâtiments.

Au contraire, pour le bâtiment témoin RT2000, l'humidité intérieure apparaît indépendante du climat extérieur.

b) Les enduits et l'importance de la respiration

Face à cette grande sensibilité à l'eau, le phénomène de respiration de l'enveloppe est très important dans le bâti ancien. Une grande attention doit alors être portée sur les enduits (extérieurs et intérieurs). L'humidité ayant pénétré dans la paroi doit pouvoir s'évacuer vers l'extérieur, sous forme liquide ou vapeur d'eau, sous peine de s'accumuler dans le mur et d'engendrer des pathologies.

Concernant les bâtiments du panel, les comportements observés n'ont fait apparaître aucun désordre particulier lié à l'humidité.

Les mesures ne font pas état de phénomènes de condensation superficielle, hivernale ou estivale : les courbes de température de surface des parois enregistrées restent systématiquement au-dessus des courbes de températures de rosée, avec une marge comprise entre +6 et +15°C.

A titre d'illustration, nous présentons ci-dessous, pour le bâtiment 10, les courbes sur quatre journées représentatives des différentes saisons, pour lesquelles les écarts entre $T(\text{surface mur})$ et $T(\text{rosée})$ sont les plus faibles.

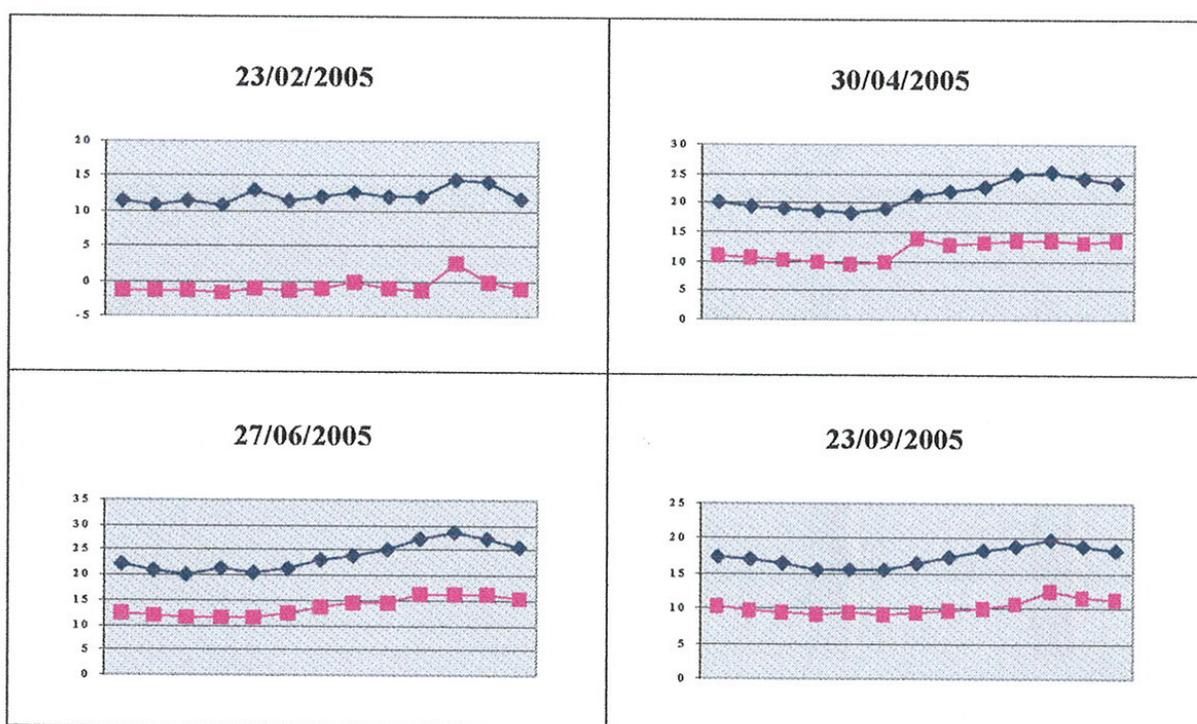


Figure 24 : comparaison entre $T(\text{surface mur})$ en rose et $T(\text{rosée})$ en bleu, en différentes saisons (cas du bâtiment 10)

c) Les autres dispositifs recensés qui assurent la durabilité du bâti ancien vis à vis de l'humidité

➤ Des enduits aux propriétés spécifiques :

Un enduit a pour rôle de subir les agressions extérieures et d'en protéger le support. Il est en conséquence une couche sacrifiée à plus ou moins long terme.

Dans le bâti ancien, les enduits sont constitués par des mortiers de chaux, de plâtre, ou un mélange de chaux et de plâtre. Le hourdage[♦], entre pierres, briques et autres matériaux, est constitué de mortiers à base d'argile, de plâtre ou de chaux, seuls ou mélangés.

[♦] Matériau remplissant les vides d'une maçonnerie, composé d'un liant et d'une ou plusieurs charges.

Quelques soient les matériaux locaux mis en œuvre, les enduits du bâti ancien présentent généralement les caractéristiques suivantes :

- Une perméabilité à la vapeur importante,
- Une perméabilité à l'eau faible,
- Une stabilité dimensionnelle,
- Des possibilités de déformabilité sans fissuration,
- Une bonne adhérence au support.

➤ **Des protections intrinsèques** au bâtiment initial, qui sont à respecter. Ainsi, des barrières à l'humidité du sol souvent additionnées :

- nature des pierres des maçonneries de fondation,
- couches de bitume,
- espaces tampons permettant l'évacuation de l'humidité (caves et vides sanitaires)

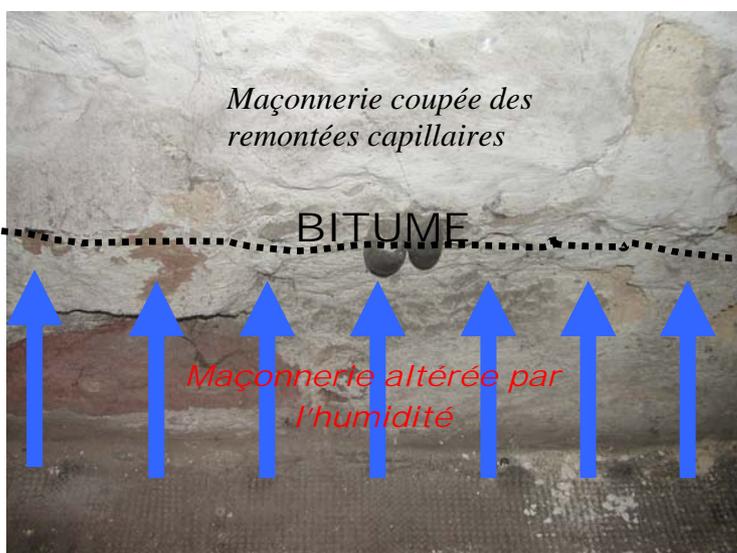


Figure 25 : protection contre les remontées capillaires dans la cave du bâtiment 2

5.4.2.2 Des propriétés thermiques particulières

a) Propriétés d'isolation

La détermination du coefficient U des parois anciennes présente deux principales difficultés, liées aux matériaux employés d'une part et aux techniques d'assemblages d'autre part.

▪ *L'emploi de matériaux locaux aux caractéristiques méconnues :*

Les valeurs théoriques telles que la conductivité thermique de la paroi doivent être déterminées avec une certaine prudence. La variabilité du coefficient lambda (en fonction des essences locales de matériaux notamment) est un paramètre difficile à identifier.

▪ *La grande hétérogénéité des parois :*

Les murs anciens présentent de nombreuses hétérogénéités : amincissement selon les étages, emploi de plusieurs matériaux, etc. qui compliquent le calcul du coefficient U de l'enveloppe.

En effet, contrairement à la plupart des modes constructifs contemporains, une paroi ancienne ne se décompose pas nécessairement en strates verticales successives. Nous pouvons retrouver très fréquemment, au sein d'une même paroi :

- des éléments « parpaings » couvrants toute l'épaisseur du mur, employés par exemple en allège, dans l'encadrement des baies, ou en linteaux.
- d'autres éléments discontinus (cas des modes constructifs en briques, alternant les faces visibles ou les demi-briques selon les modes d'assemblage)
- des liants divers (en remplissage ou en enduit)

La figure ci-dessous met en évidence cette forte hétérogénéité de l'enveloppe, par thermographie infrarouge.

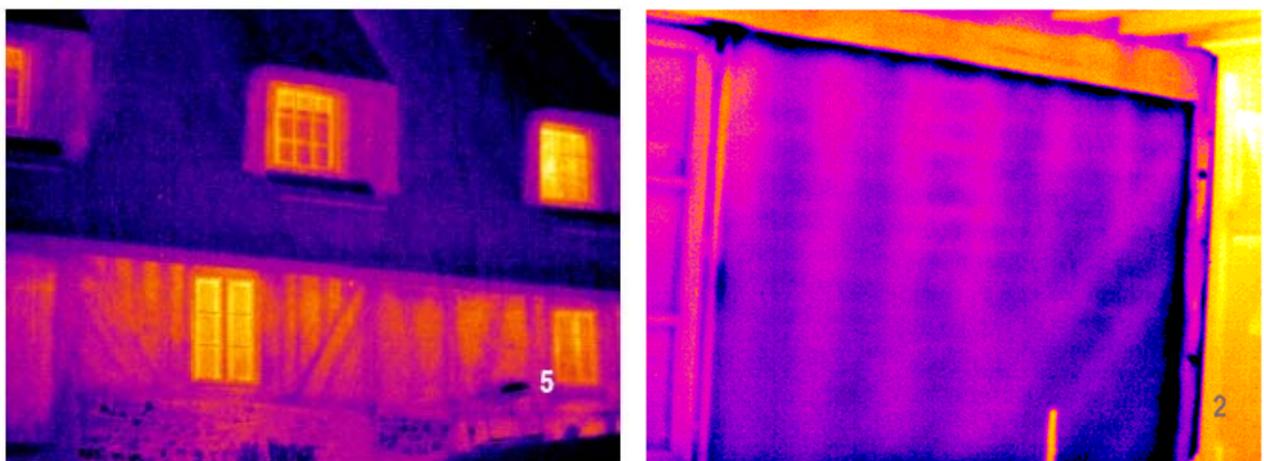


Figure 26 : Mise en évidence, par thermographie infrarouge de l'hétérogénéité de l'enveloppe : soubassement en pierre ; étage en pans de bois + torchis ; toiture en chaume (bâtiment 10)

b) Propriétés d'inertie thermique

Les paragraphes précédents (« mode constructif » et « organisation intérieure ») ont pu montrer la présence importante d'éléments lourds à l'intérieur des constructions anciennes : refends en brique ou en pierre, planchers lourds, etc. Cette importante masse thermique interne au logement favorise le phénomène d'inertie thermique. L'inertie intervient dès lors que les excitations d'un système sont variables dans le temps. Plus l'inertie d'une paroi est élevée, plus celle-ci est capable de stocker et de restituer des quantités importantes de chaleur en hiver ou de fraîcheur en été, plus elle met de temps à s'échauffer ou à se refroidir.

Ce phénomène d'inertie est essentiel en thermique d'été mais également en hiver ou en demi-saison.

- **En été**, le phénomène d'inertie mesuré sur les bâtiments du panel permet d'obtenir un décalage des courbes de température entre l'intérieur et l'extérieur pouvant atteindre **8 h** et un écart de température de **6°C** (cf. graphique page suivante : cas du bâtiment 7, en murs de pierre atteignant 80cm d'épaisseur). Grâce à ce déphasage, le bâtiment conserve des conditions de confort d'été très satisfaisantes, tout au long de la journée.

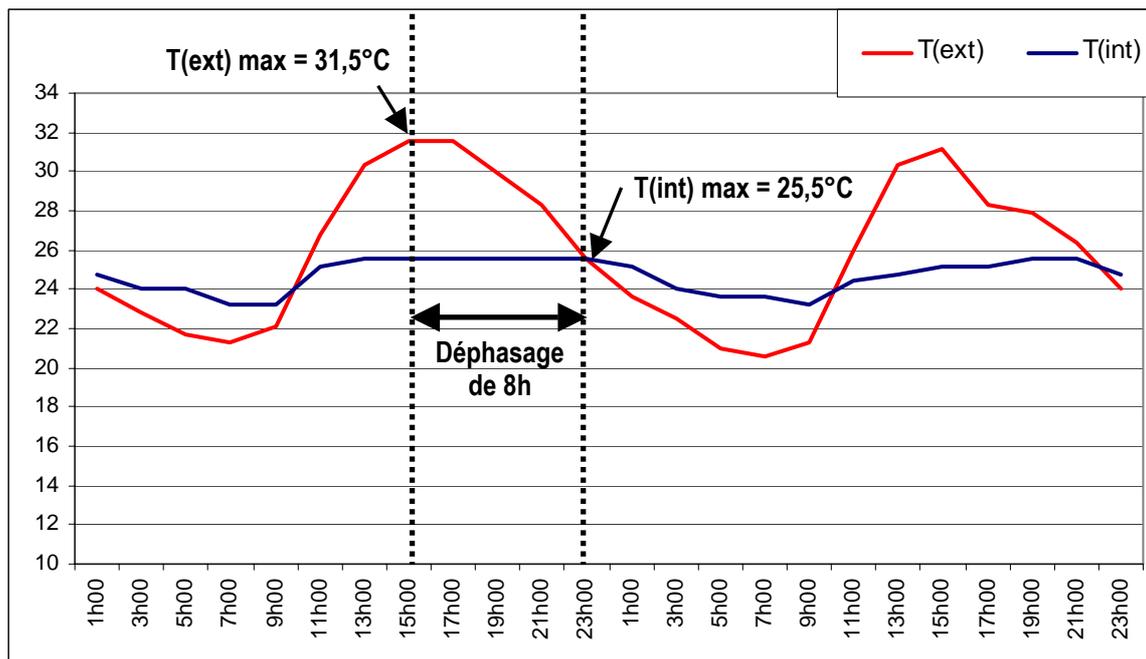


Figure 26 : Évolution des températures extérieures et intérieures lors de deux journées types d'été (28 et 29 juin 2005 – bâtiment 7) : mise en évidence du phénomène d'inertie et du confort d'été résultant.

- **En hiver**, il permet de stocker et de réguler les apports gratuits dont bénéficie éventuellement le logement. Il autorise également une gestion intermittente du système de chauffage. Ainsi, en période d'absence, alors que le chauffage peut être réduit, les éléments inertes diffusent la chaleur emmagasinée et permettent de conserver une température de confort satisfaisante. (Cf. aussi paragraphe 5.6.)
- **En mi-saison**, le phénomène d'inertie saisonnière (accumulation de la chaleur de la saison précédente) associé aux apports gratuits permet de retarder la mise en route du système de chauffage.

5.4.3 Prise en compte de ces spécificités par les méthodes de calcul

Concernant la modélisation du comportement thermique de l'enveloppe des bâtiments anciens, nous pouvons mettre en évidence deux difficultés principales :

- La première concerne la prise en compte de la conductivité réelle des parois :

La multitude des matériaux locaux employés nécessite une banque de données exhaustive dont les logiciels ne disposent pas à l'heure actuelle. En outre, il apparaît difficile de restituer la conductivité réelle de parois parfois très hétérogènes.

- Le second point concerne la prise en compte du phénomène d'inertie :

Celui-ci, très présent sur les enregistrements de température observés, devrait être modélisé de façon fidèle. Or, il apparaît très difficile d'appréhender des phénomènes dynamiques sur ces logiciels, basés sur un régime stationnaire, faisant recours à des valeurs forfaitaires non adaptées au bâti ancien (inertie très forte pour des murs en pierre pouvant atteindre 80 cm d'épaisseur).

5.4.3.1 Logiciel 3CL.

- *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Les compositions et les épaisseurs variables des parois opaques ne peuvent pas être saisies de façon précise.
- Les propriétés thermiques des matériaux et des parois hétérogènes ne sont pas mesurées in situ.
- Les coefficients de déperditions thermiques peuvent être considérées comme inconnus par 3CL, mais des valeurs pour ces coefficients peuvent également être saisies.
- Il n'y a pas de données à saisir concernant les caractéristiques hygrométriques des parois.
- Pour caractériser les parois, plusieurs notations sont utilisées (K, U, R), sans référence avec la RT2000.

- *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- Idem ci-dessus.
- Les propriétés thermiques de plusieurs matériaux et composants (maçonnerie de pierre de silex, chaînages verticaux en pierres gréseuses taillées, couverture de chaume, enduit chanvre et chaux, pans de bois traversant et torchis, parquet de bois lourd non jointif, liaisons bois/pierres, pierres de grés harpées, fixation des menuiseries, planchers bouvetés) ne sont pas mesurées in situ.
- Les coefficients de déperditions thermiques peuvent être considérées comme inconnus par 3CL, mais des valeurs pour ces coefficients peuvent parfois être saisies.
- La géométrie atypique des éléments constructifs n'est pas saisie (épaisseurs variables au niveau des allèges de fenêtres, B6)

5.4.3.2 Logiciel ClimaWin

- *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Les compositions et les épaisseurs variables des parois peuvent être saisies de façon détaillée avec CW, cependant la saisie est difficile et prend plusieurs jours.
- Les plans fournis lors du diagnostic ont été redessinés pour faciliter la saisie des données géométriques.
- CW propose une banque de données des matériaux où il est parfois difficile d'identifier les matériaux rencontrés: il n'y a qu'une valeur de conductivité disponible pour la roche schiste-ardoise, la valeur de la conductivité de la terre cuite proposée par CW diffère de celle du diagnostic, le diagnostic ne permet pas de caractériser précisément les différents enduits de plâtre proposés par CW.

- *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- Idem ci-dessus
- Les propriétés thermiques de quelques matériaux ne sont pas proposées: pierre de silex, pierres gréseuses, chaume, enduit chanvre et chaux, bois traversant et torchis, bois lourd non jointif, pierres de grés harpées.
- Des parois spécifiques peuvent être définies, mais cette saisie prend plusieurs jours.

5.4.3.3 Logiciel ECPro

- *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Les hypothèses ont été celles définies à partir du travail précédemment effectué avec CW.
- Les ponts thermiques sont définis par un pourcentage des déperditions thermiques des parois.
- La saisie des données est plus rapide, moins détaillée et moins précise que celle de CW.

- La difficulté à considérer de rez-de-chaussée du bâtiment B4 met en évidence la différence de calcul des déperditions thermiques entre locaux chauffés et locaux non chauffés: la prise en compte du flux thermique se fait du local chauffé vers le local non chauffé pour ECPro (inverse pour CW).
- La prise en compte du plancher sur le porche pour le bâtiment B5 doit être vérifiée.

- *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- Idem CW, mais la saisie est plus rapide.
- La difficulté à définir les caractéristiques thermiques du plancher en granit pour le bâtiment B8 ne permet pas une saisie précise.
- Les classes d'inertie utilisées sont celles de CW (RT2000).

5.4.4 Précautions à prendre lors de réhabilitation

5.4.4.1 Précautions à prendre vis à vis de l'humidité

Il convient de ne pas supprimer les barrières de protection existant sur le bâtiment, en particulier :

- Supprimer des éléments de modénature (bandeaux, corniches, ...) qui collectaient l'eau et protégeaient la façade du cumul du ruissellement d'eau,
- Court-circuiter les coupures de remontées capillaires des soubassements par l'ajout d'un enduit hydrofuge.

Il faut également respecter la fonction de respiration des parois :

- Ne pas appliquer sur des maçonneries anciennes d'enduits ou de revêtements trop rigides ou trop imperméables à la vapeur d'eau,
- Ne pas accoler sur la face intérieure des murs des matériaux imperméables.

Dans le bâti ancien, les enduits intérieurs sont souvent réalisés au plâtre. Le plâtre, très hydrophile, joue un rôle important de régulateur de l'humidité à l'intérieur des locaux : il en absorbe l'excès qu'il libère lorsque l'air intérieur est trop sec. Imperméabiliser ou accoler à ces murs des panneaux sans aménager une lame d'air ventilée peut provoquer une accumulation d'eau dans les murs ou panneaux, et engendrer des pathologies.

5.4.4.2 Conserver les propriétés thermiques du bâti

- Rapporter un isolant thermique sur la face intérieure d'une paroi à forte inertie thermique diminue les propriétés d'inertie du bâtiment. Par ailleurs, il faut choisir des matériaux perméables à la vapeur d'eau (isolant non étanche associé à des enduits intérieur et extérieur eux-aussi non étanches).
- De façon générale, il faut prendre garde aux interventions utilisant des matériaux et des procédés contemporains pouvant s'avérer inadaptés au bâti ancien. Ces procédés peuvent contribuer non seulement à lui faire perdre ses qualités thermiques mais aussi engendrer des pathologies.

5.5 Les ouvertures

5.5.1 Description générale

Le rôle des fenêtres et des portes-fenêtres est primordial dans un logement : elles assurent l'accès à l'éclairage naturel, la récupération des apports solaires en hiver ou encore à la ventilation. Mais elles peuvent également engendrer des déperditions thermiques et un effet de paroi froide important, surtout si elles sont uniquement munies de simple vitrage.

Concernant les bâtiments anciens du panel, certaines caractéristiques des ouvertures ont déjà été mises en évidence dans le paragraphe concernant le mode constructif :

- le côté traversant
- l'adaptation de leur taille à l'orientation de la façade.

D'autres propriétés des ouvertures du bâti ancien sont présentées ci-dessous. Nous distinguons pour cela les ouvertures dites simples (menuiseries simples, quel que soit le matériau employé, vitrage simple ou double) des ouvertures dites spécifiques (doubles fenêtres, oriel, véranda)

5.5.2 Spécificités du bâti ancien

5.5.2.1 Ouvertures simples

▪ Performances thermiques des ouvertures

D'une façon générale, les ouvertures rencontrées sur les bâtiments du panel présentent les caractéristiques suivantes :

- Elles permettent des apports solaires en hiver de part leur position, leur taille ou leur orientation.
- Un relatif faible ratio d'ouvertures par rapport à la surface totale de l'enveloppe qui limite les déperditions thermiques
- En thermique d'été, les ouvertures jouent leur rôle également : volets extérieurs permettant une protection solaire efficace, ventilation possible grâce à une organisation en plan traversant.

Remarquons également certaines faiblesses thermiques :

- Le type de vitrage ne répond plus aux exigences d'isolation actuelle (simple vitrage souvent employé).
- Le type de menuiseries : des défauts d'étanchéité ont pu être localisés sur plusieurs bâtiments du panel, grâce à la thermographie infrarouge.

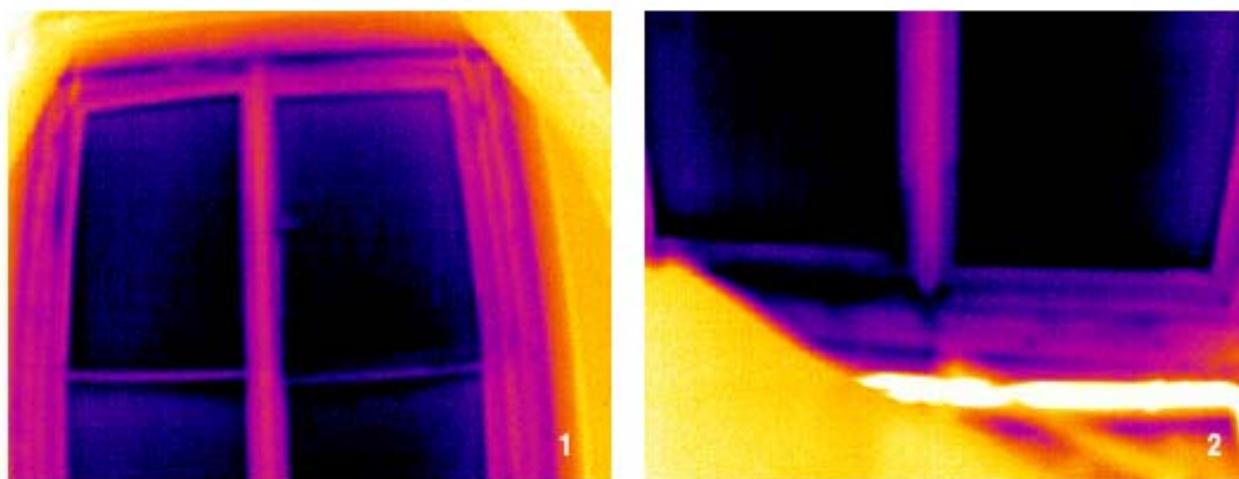


Figure 27 : Menuiseries bois – simple vitrage, présentant des défauts d'étanchéité à l'air importants (bâtiment 5)

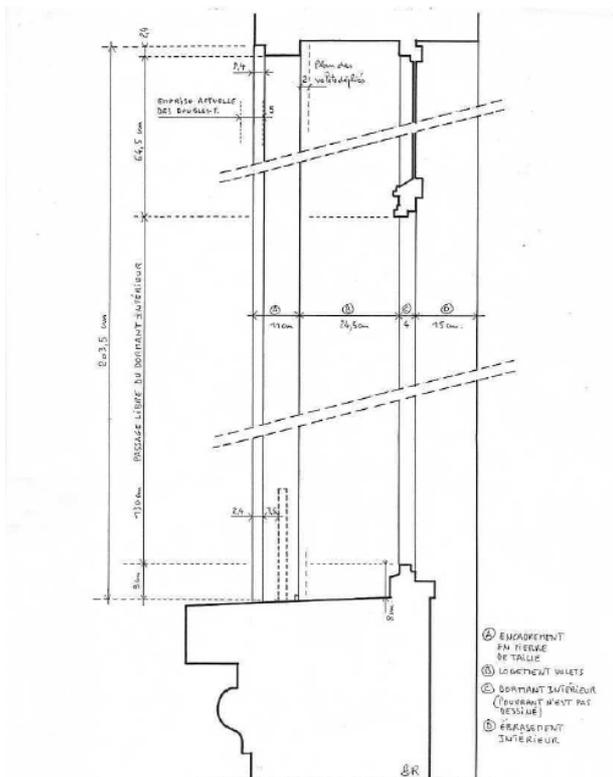
- *La fonction importante de ventilation*

En habitat ancien, la non étanchéité des fenêtres est aussi **la principale source de ventilation pour le logement**. Remplacer les menuiseries anciennes par des menuiseries étanches peut provoquer des désordres liés à la condensation. Un éventuel remplacement des menuiseries devrait donc s'accompagner d'une réflexion sur le système de ventilation à mettre en place.

5.5.2.2 Ouvertures spécifiques : des dispositifs thermiques particuliers

Certains bâtiments anciens présentent des systèmes d'ouvertures remarquables, formant de véritables espaces tampons « actifs » pour le logement. Nous pouvons principalement recenser :

- *les doubles fenêtres*



La double fenêtre crée un espace tampon entre l'extérieur et l'intérieur du logement.

- En hiver ou en mi-saison, l'air neuf entrant dans cet espace est préchauffé par effet de serre, engendrant ainsi des économies d'énergie.

- En été, le fenêtre extérieure peut être ouverte, annulant ainsi cet effet de serre. Un système de volets placé dans l'interstice protège par ailleurs le logement du rayonnement solaire.

Le fonctionnement d'un tel système a été réinterprété sur de nombreux bâtiments contemporains, sous la forme de double peau.

Figure 28 : Coupe verticale sur une double fenêtre (bâtiment 2)

- *Les vérandas thermiques (incluant oriel ou bow-window)*



Le principe de fonctionnement est identique à celui des doubles fenêtres : créer un espace tampon actif entre l'intérieur et l'extérieur du logement. Ici, l'espace tampon prend simplement des dimensions plus grandes et vient prolonger un séjour par exemple.

Figure 29 : Exemple de bow window sur les immeubles anciens

5.5.3 Prise en compte de ces spécificités par les méthodes de calcul

5.5.3.1 Logiciel 3CL

- *Logements collectifs (B1 à B5)*
 - Les caractéristiques des menuiseries et des vitrages sont saisies avec 3CL, sans pouvoir préciser les scénarios d'utilisation des fenêtres en matière de ventilation naturelle.
 - Les caractéristiques spécifiques ne sont pas saisies (volets dans l'embrasure, ponts thermiques).
 - L'existence de menuiseries neuves n'est pas saisie.
 - Les caractéristiques des vitrages et des masques solaires sont simplifiées: notion de vitrages sud dégagés ou véranda
- *Maisons individuelles (B6 à B11)*
 - Idem ci-dessus.
 - Les lames de verre orientables pour les fenêtres (B5), associées aux dispositifs de ventilation naturelle ponctuelle ne sont pas saisies.
 - Des défauts signalés par le diagnostic ne peuvent être saisis: défauts de perméabilité des volets roulants (B11)

5.5.3.2 Logiciel ClimaWin

- *Logements (B1 à B5)*
 - La banque de données des menuiseries fournit les caractéristiques correspondant aux parois vitrées.
 - La description précise des ouvertures n'est pas facile à saisir (volets, ponts thermiques).
- *Maison individuelle (B6 à B11)*
 - Les menuiseries avec double vitrage, sans volet, sont disponibles dans la banque de données, sans précision des petits bois en apposition.
 - Des composants spécifiques peuvent être définis.

5.5.3.3 Logiciel ECPro

- *Logements (B1 à B5)*
 - Les vitrages peuvent être définis s'ils ne sont pas dans la base de données.
 - Un facteur d'ombrage peut être défini, mais les contraintes sont aussi celles de CW.
- *Maison individuelle (B6 à B11)*
 - La base de données, moins importante que celle de CW, fournit les caractéristiques de quelques menuiseries. D'autres données peuvent être saisies. Les contraintes de la saisie sont aussi celles de CW.

5.5.4 Précautions à prendre lors de réhabilitation

Un des principaux sinistres dans les bâtiments anciens vient du remplacement des anciennes fenêtres qui étaient perméables à l'air et qui permettaient ainsi la ventilation du logement, par des fenêtres neuves et étanches sans entrée d'air, donc qui ne permettent plus d'assurer la ventilation. Il y a alors risque d'apparition de condensations et de moisissures et d'autres champignons dans les parois du bâtiment. Ainsi, en cas de remplacement des fenêtres, il serait impératif d'assurer une bonne ventilation du logement : opter par exemple pour des fenêtres équipées d'entrées d'air, ou autre système de ventilation performante.

Cas des contraintes architecturales et patrimoniales :

Certains bâtiments anciens présentent une valeur patrimoniale reconnue. Les modifications éventuelles des ouvertures sont alors soumises à un avis réglementaire et doivent respecter certaines contraintes architecturales : cas des fenêtres à meneaux, des vitraux, etc.

Si la pose de menuiseries neuves à double vitrage devait être proscrite, d'autres solutions peuvent être envisagées comme par exemple :

- la mise en place d'une double fenêtre, à condition de pouvoir les poser côté intérieur,
- l'installation d'un vitrage à isolation renforcée sur la menuiserie existante, sous réserve que celle-ci supporte la modification.

5.6 Les équipements

5.6.1 Description générale

Dans les bâtiments neufs, les équipements constituent généralement un moyen important de régulation du confort intérieur (ventilation artificielle, éclairage artificiel, chauffage,...).

Dans les bâtiments anciens, ils sont généralement peu développés. Ils représentent également, à ce titre, une piste importante en matière d'économie d'énergie : remplacement de moyens de chauffage vétuste par des installations à meilleur rendement, recours aux énergies renouvelables, etc.

5.6.2 Spécificités du bâti ancien

Nous présentons ici les caractéristiques des équipements des bâtiments du panel.. Leur gestion est présentée dans le paragraphe suivant (« les occupants »).

5.6.2.1 Les systèmes de ventilation

Les bâtiments du panel ne possèdent pas de systèmes de ventilation mécanique contrôlée. Ce sont les ouvertures qui, de part leur non étanchéité, assurent une ventilation naturelle du logement (cf. paragraphe précédent).

Dans certains cas, des systèmes d'extraction mécanique ont simplement été ajoutés dans les pièces humides (cas du bâtiment 8).

5.6.2.2 Les systèmes de chauffage courants (ECS + chauffage)

Les systèmes utilisés pour ce poste sont variables dans le panel de bâtiment étudié.

Nous observons toutefois des constantes :

- Des équipements relativement vétustes ou présentant de faibles rendements énergétiques,
- Une méconnaissance des caractéristiques des équipements.

5.6.2.3 Les systèmes de chauffage d'appoint

Les systèmes de chauffage d'appoint sont nombreux sur le panel. Ce sont par exemple des poêles ou cheminées qui initialement, constituaient souvent le moyen de chauffage principal.

5.6.3 Prise en compte de ces spécificités par les méthodes de calcul

5.6.3.1 Logiciel 3CL

- *Logements (B1 à B5)*

- Les caractéristiques techniques précises et l'ancienneté des équipements ne sont pas saisies.
- Les caractéristiques particulières des équipements ne sont pas saisies: géométrie variable des réseaux dans l'immeuble, des équipements plus ou moins vétustes et performants, équipements d'appoint.
- Une liste d'équipements ne permet pas de sélectionner avec précision les équipements existants.
- Les caractéristiques techniques des équipements hétérogènes ne peuvent pas être saisies.
- Les scénarios d'intermittence ne sont pas saisis avec 3CL.
- La ventilation manuelle saisie avec 3CL ne précise pas les débits de renouvellement d'air.

- Les caractéristiques des autres équipements (éclairage, cuisson, électroménager, etc.) ne sont pas demandées. Il n'est pas fait référence à la RT2000.

- *Maison individuelle (B6 à B11)*

- Idem ci-dessus.

- Le système de chauffage (cheminée, chaudière dans le cellier, et réseau parfois hors l'espace habité) n'est pas décrit avec 3CL.

- Les différentes techniques de ventilation (B6) et les débits de renouvellement d'air ne sont pas saisis.

5.6.3.2 Logiciel ClimaWin

- *Logements (B1 à B5)*

- Les caractéristiques techniques précises et l'ancienneté des équipements du logement ne sont pas connues mais des précisions détaillées des équipements peuvent être saisies.

- L'appoint de chauffage avec une cheminée ne peut pas être saisi.

- Le schéma du réseau de chauffage et ECS doit être dessiné pour saisir notamment ses caractéristiques techniques.

- La saisie des caractéristiques des équipements est facilitée par des banques de données précises. Cependant, le diagnostic ne fournit pas la référence commerciale permettant d'identifier l'installation de chauffage dans la banque de données. Les données relatives à la ventilation et aux autres équipements sont saisies selon la RT2000.

- *Maison individuelle (B6 à B11)*

- Idem ci-dessus.

- Un schéma du réseau de chauffage et ECS a été dessiné pour faciliter les saisies avec CW.

- La cheminée n'est pas proposée avec CW, et ne peut pas être saisie.

5.6.3.3 Logiciel ECPro

- *Logements (B1 à B5)*

- La prise en compte des usages standards ou personnalisés est possible.

- La base de données des équipements de la version prototype ECPro est incomplète, comme celles de 3CL et CW.

- La caractérisation des réseaux a une forte influence sur le calcul des consommations.

- La saisie des données est plus simple que celle faite avec CW.

- La prise en compte d'une production d'énergie mixte doit être vérifiée.

- Le diagnostic du rez-de-chaussée du bâtiment B4 n'a pas permis de considérer les équipements ECS pour le calcul de la consommation avec ECPro.

- Le questionnaire électronique permet de décrire plus précisément les équipements

- *Maison individuelle (B6 à B11)*

- Pour le bâtiment B7, il n'est pas possible de saisir les différents modes de chauffage, avec plusieurs sources d'énergie. L'intermittence du chauffage et l'implantation éloignée de la chaudière ne sont pas prises en compte.

- La saisie est plus rapide que celle de CW.

- Le questionnaire électronique permet de décrire plus précisément les équipements et leurs usages.

5.7 Les occupants

5.7.1 Description générale

Le système « occupant » est un paramètre plus ou moins influent des performances énergétiques du bâtiment :

- Sur le bâtiment neuf (bâtiment 11 du panel), la tendance observée est que la contribution de l'occupant à la gestion thermique du bâtiment est faible. Elle se limite le plus souvent à la définition d'une température de confort, celle –ci étant ensuite obtenue et régulée de manière « automatique ». Il en va de même pour la ventilation, qui est gérée mécaniquement sur ce type de bâti.
- Architecture bioclimatique signifie littéralement « qui vit avec le climat ». Cette définition prend tout son sens en gestion thermique du bâtiment ancien. Les enquêtes menées au cours de l'étude auprès des occupants font en effet état d'une gestion particulière, basée sur une compréhension et une intégration du comportement bioclimatique du bâtiment ancien.
Lors de l'analyse du comportement thermique d'un bâtiment ancien, la prise en compte du scénario d'occupation est alors indispensable.

Nous explicitons cette gestion dans le paragraphe suivant, en distinguant la thermique d'hiver et la thermique d'été.

5.7.2 Spécificités du bâti ancien

5.7.2.1 Comportement des occupants en thermique d'hiver♦

En raison des caractéristiques bioclimatiques présentées dans les paragraphes précédents (notamment : forte inertie, forme compacte, implantation qui intègre les spécificités du contexte climatique local,...) les bâtiments anciens offrent **une possibilité d'une gestion thermique au « plus près », en relation avec le climat extérieur.**

Ainsi, le mode de gestion du chauffage peut suivre le scénario suivant, plusieurs fois recensé auprès des habitants du panel :

- fixer une température de consigne entre 19° et 21°C pendant l'occupation en journée,
- réduire le chauffage (voire le couper) en période nocturne ou en période d'absence,

Grâce notamment au phénomène d'inertie qui permet de stocker la chaleur (produite par le chauffage ou provenant des apports solaires) puis de la restituer (pendant les périodes sans production), le confort thermique du logement est assuré pendant toute la journée.

A titre d'illustration, nous présentons ci-dessous le scénario d'occupation et la température intérieure du bâtiment 2, sur une journée représentative de la période hivernale :

- Présence des occupants de 18h à 8h
- Ventilation hygiénique de 7h à 8h
- Chauffage programmé entre 16h et 23h. En dehors de ces plages, le chauffage est réduit au minimum.

♦ Synthèse des questionnaires soumis aux occupants et de l'analyse des conditions des enregistrements in situ

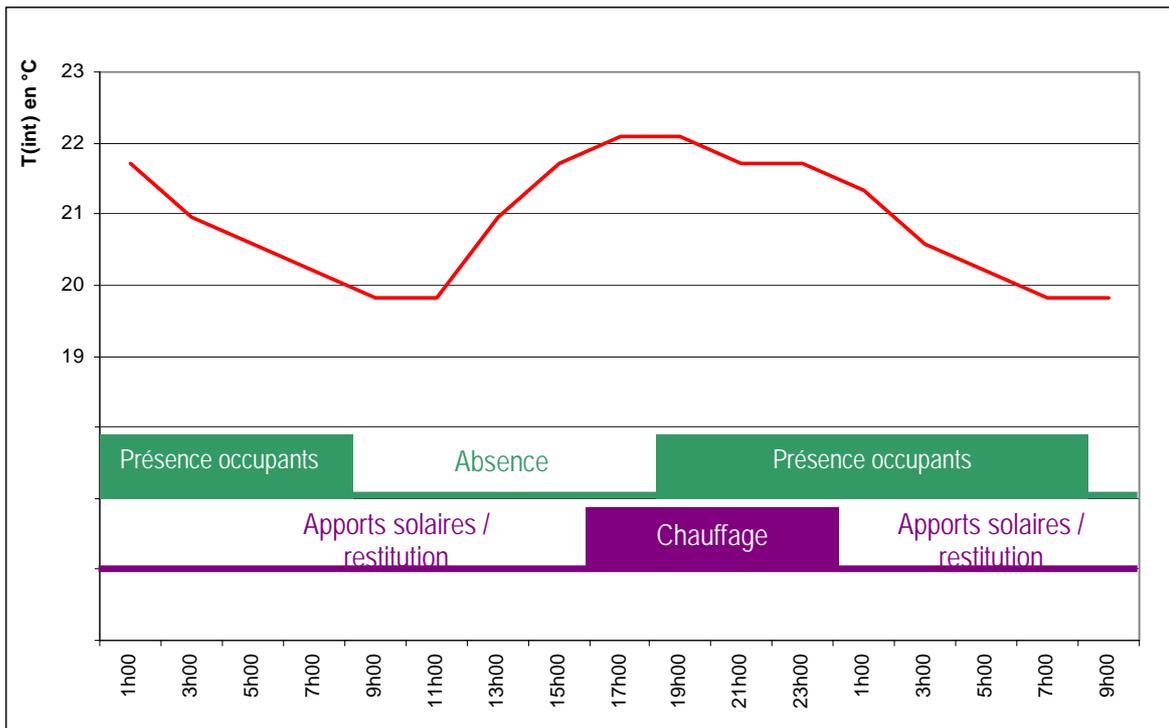


Figure 30 : Évolution de la température intérieure et scénario d'occupation pendant une journée type d'hiver (5 et 6 décembre 2005 - bâtiment 2)

Nous constatons au travers de ce graphique, la gestion possible du confort thermique d'hiver d'un bâtiment ancien, reposant sur une combinaison des apports solaires et du chauffage, l'ensemble étant régulé par la forte inertie du logement.

Dans le cas présent, cette inertie permet d'emmagasiner une partie de la chaleur et de la restituer en dehors des périodes de chauffage, sans préjudice pour le confort thermique : la température intérieure ne descend pas sous la barre des 19°C.

5.7.2.2 Comportement des occupants en thermique d'été ♦

En thermique d'été également, les caractéristiques bioclimatiques des bâtiments du panel (masques et autres protections solaires, inertie, transversalité du plan,...) permettent à l'occupant de réaliser des gestes simples, favorables au confort :

- rafraîchissement naturel du logement pendant la nuit
- fermeture de tous les volets la journée en période d'inoccupation (afin de limiter les apports solaires)
- fermeture des fenêtres en journée (afin de conserver la fraîcheur emmagasinée dans le logement)

Ce comportement bioclimatique (du bâtiment et aussi des occupants) abouti à des performances intéressantes en confort d'été.

On observe ainsi, sur les bâtiments du panel, des écarts de température favorables entre intérieur et extérieur : les valeurs $[T(\text{ext}) \text{ max} - T(\text{int}) \text{ max}]$ peuvent atteindre 7°C, comme l'illustre le graphique page suivante.

♦ Synthèse des questionnaires soumis aux occupants et de l'analyse des conditions des enregistrements in situ

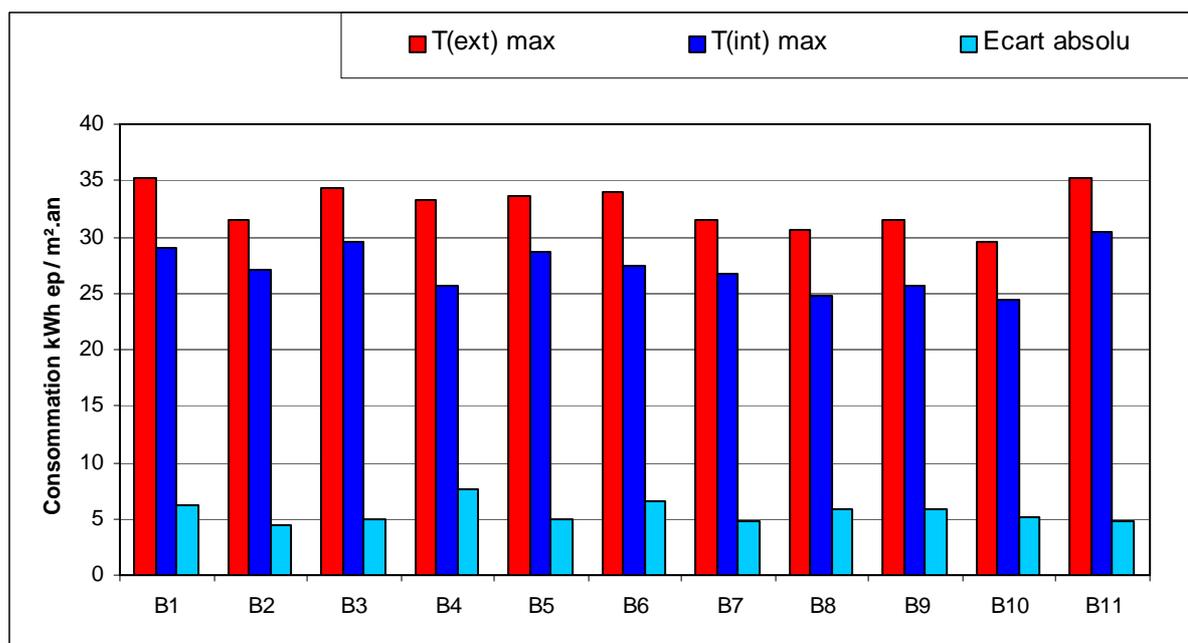


Figure 31 : Comparaison des valeurs de Tic simulée et de la température résultante intérieure maximale mesurée in situ, pour chacun des bâtiments du panel.

5.7.3 Prise en compte de ces spécificités par les méthodes de calcul

5.7.3.1 Logement 3CL

- *Logements collectifs (B1 à B5)*
 - Les informations concernant les occupants (nombre, etc.) et leurs exigences de confort thermique pour ce logement ne sont pas demandées par 3CL.
 - L'adaptation des occupants aux ambiances thermiques (été/hiver) et lumineuses n'est pas demandée.
 - 3CL ne demande pas d'information concernant l'occupation du logement
- *Maisons individuelles (B6 à B11)*
 - Idem ci-dessus

5.7.3.2 Logement ClimaWin

- *Logements collectifs (B1 à B5)*
 - CW s'appuie sur l'approche simplifiée de la RT2000.
 - La notion de température intérieure conventionnelle est utilisée selon la RT2000.
 - L'adaptation des occupants aux conditions thermiques est très difficile à saisir avec CW (intermittence du chauffage, appoint de la cheminée).
- *Maisons individuelles (B6 à B11)*
 - Idem ci-dessus

5.7.3.3 Logement ECPPro

- *Logements collectifs (B1 à B5)*

- Un questionnaire électronique permet de recueillir les informations relatives aux équipements et aux comportements des occupants.

- *Maisons individuelles (B6 à B11)*

- Un questionnaire électronique permet de recueillir les informations relatives à l'occupation de chaque maison individuelle.

- Le questionnaire met en évidence l'occupation très variable du bâtiment B7, particulièrement difficile à diagnostiquer.

5.7.4 Précautions à prendre lors de réhabilitation

Le diagnostic peut faire apparaître une différence sensible entre les consommations réelles d'énergie et les estimations théoriques. Avant d'invoquer les habitudes des occupants, il faut comprendre le comportement bioclimatique du bâtiment.

6 CONCLUSION GENERALE

6.1 Les spécificités du bâti ancien – tableau synthétique

La présente étude, s'inscrivant dans le cadre des travaux préalables à la mise en place du dispositif réglementaire concernant les économies d'énergie dans les bâtiments existants, a permis une mise en évidence des propriétés thermiques du bâti ancien, qui le distingue des modes constructifs modernes. Ces caractéristiques sont résumées de façon générale dans le tableau synthétique ci-dessous.

	Caractéristiques des constructions anciennes	Évolutions constatables suite à l'industrialisation du 20^{ème} siècle (constructions > 1950)
Environnement et implantation	La recherche d'une implantation prenant en compte la course du soleil, les vents dominants, les pluies et l'hydrologie du terrain (cas des constructions en milieu rural)	Des apports climatiques potentiels souvent négligés : implantation aléatoire, ouvertures réparties sans toujours tenir compte de l'ensoleillement (l'urbanisme du chemin de grue)
	Une forte corrélation du comportement thermique du bâtiment vis-à-vis du contexte extérieur (cf. mesures du paragraphe 5.1)	Une dépendance moins importante du bâti par rapport au site (cf. mesures du paragraphe 5.1)
Organisation intérieure	Une organisation des pièces selon leur destination et leur orientation avec des espaces tampons nombreux selon les types d'activités, des ouvertures dimensionnées selon des besoins spécifiques	Des plans types d'appartement généralisés et assemblés pour former des volumes indépendamment de l'environnement proche.
	Des plans de logements généralement traversant	Des plans mono-orientés ne permettant pas de ventilation naturelle
Mode constructif	Des modes constructifs élaborés avec des matériaux locaux	Des systèmes constructifs conçus en fonction de contraintes économiques et industrielles imposées par l'essor démographique,
	Des bâtiments à structure lourde : maçonneries porteuses, utilisées en façades et refends intérieurs, ayant une forte inertie thermique	Des systèmes constructifs légers, de type poteaux-poutres, libérant l'intérieur du bâtiment de parois porteuses lourdes
	Un dimensionnement des murs bien ajusté à leur rôle structurel, par exemple des maçonneries avec amaigrissements successifs selon les étages en proportion des charges des planchers.	Une standardisation des modes constructifs qui ne différencie plus les parois porteuses selon les façades ou les étages.
	Des liaisons façade-planchers discontinues limitant les ponts thermiques (cf. paragraphe 5.3)	Des liaisons planchers-façades continues pouvant engendrer d'importants ponts thermiques

Enveloppe (parties opaques)	Des parois verticalement très hétérogènes entraînant des difficultés quant à la détermination du coefficient U : hétérogénéité des matériaux non organisés en strates verticales, variabilité de l'épaisseur des parois selon les étages, ...	Des parois verticales généralement homogènes et standardisées pour une construction donnée.
	Une enveloppe composée de matériaux qui doivent être caractérisés par un triplet d'indicateurs thermiques : conductivité, diffusivité, perméabilité à l'air et à l'eau.	Une enveloppe composée de matériaux dont la caractérisation thermique peut essentiellement se restreindre à leur conductivité
	L'utilisation de matériaux très sensibles à l'humidité (maçonneries de pierres, plâtre, charpenteries de bois, mortiers à la chaux aérienne)	Des matériaux de structure manufacturés, le plus souvent insensibles à l'humidité
	Des barrières à l'humidité du sol organisées de nombreuses manières : nature des pierres des maçonneries de fondation, couches de bitume, espaces tampons permettant l'évacuation de l'humidité (caves et vides sanitaires)	Protections plus simples par films ou enduits dégradables sur les fondations enterrées.
Ouvertures	Des ouvertures généralement non-étanches, sources de déperditions thermiques mais aussi principales sources de ventilation hygiénique du logement	Des ouvertures généralement étanches
	Des ouvertures spécifiques (cas des doubles fenêtres, des bow-windows) qui jouent le rôle d'espace tampon actif : récupération des apports solaires et préchauffage de l'air neuf entrant	Principe ci-contre réinterprété sous forme de double enveloppe
Équipements	Des équipements généralement vétustes et jouant un rôle thermique secondaire par rapport au bâti	Des équipements multiples (chauffage, ventilation,...) et performants, venant éventuellement pallier une conception non « bioclimatique »
	Des sources d'énergie secondaires et ponctuelles (cheminées, poêles, ...) permettant un usage et un chauffage différenciés par pièce	Une gestion des équipements automatisée et centralisée
Occupants	Un comportement « bioclimatique » des occupants, qui interagissent avec le bâtiment et le site (ouvertures et fermetures des baies, gestion d'une ventilation naturelle, ...), en fonction des saisons	Un rôle secondaire de l'occupant, pouvant se réduire à la définition d'une température de consigne

6.2 La prise en compte de ces spécificités dans les logiciels de calcul actuels

L'étude de la prise en compte des spécificités du bâti ancien avec trois logiciels de calcul a été conduite avec deux versions du logiciel 3CL (versions 11 et 14), le logiciel ClimaWin (version 3.2) et le logiciel ECPro (version prototype).

Les trois logiciels diffèrent selon les finalités des concepteurs, la nature et le nombre des données d'entrée, leurs algorithmes de calcul, leurs données de sortie, et leurs utilisateurs potentiels.

Les 3 logiciels de calcul utilisent des environnements informatiques différents qui ne sont pas toujours disponibles pour tous les utilisateurs PC ou MAC. Par exemple, la compatibilité du logiciel 3CLv14 (sous environnement Excel) avec le logiciel de bureautique OpenOffice doit être vérifiée (risques de problèmes avec les macros Excel). Ainsi, nous avons utilisé les logiciels sur PC sans OpenOffice. Les contraintes liées aux configurations informatiques n'ont pas été testées.

Les logiciels ont été utilisés dans l'ordre suivant: 3CLv11, CW, ECPro et 3CLv14. Les saisies des données d'entrée ont été les plus rapides avec 3CLv14 (familiarisation des diagnostics par rapport à 3CLv11), puis 3CLv11, ECPro et enfin CW. Les temps de saisie des données d'entrée pour un logement ancien, avec simulations et vérification, sont en moyenne, de plusieurs dizaines de minutes avec 3CL, de 3 à 6 jours pour ECPro et de 5 à 15 jours pour CW. La plus courte durée correspond à une bonne maîtrise des logiciels avec notamment une meilleure connaissance des interfaces et des arborescences de menus, et une bonne connaissance des contenus des rapports de diagnostics.

Les données d'entrée relatives aux 11 logements anciens sont issues des rapports des diagnostics effectués in situ, selon le protocole déterminé au début de l'étude. Les résultats ne sont valables que pour les versions utilisées.

- Toutes les caractéristiques de l'environnement et de l'implantation de chaque logement ne peuvent pas être saisies avec les 3 logiciels. Les spécificités locales sont plus ou moins faciles à saisir selon les logiciels: orientation, climat local, géométries particulières, contraintes thermiques variées, singularités thermo-aérauliques, mitoyennetés thermiques, etc. Les saisies avec le logiciel 3CL sont les moins précises alors que celles de 3CW et ECPro sont plus détaillées.

- L'organisation des espaces intérieurs (distribution) n'est pas saisie avec 3CL. Les définitions de plusieurs zones thermiques sont possibles avec les 2 autres logiciels. Cependant, les spécificités géométriques des bâtiments étudiés sont parfois difficiles à saisir: parois composites d'épaisseurs différentes, espaces chauffés et non chauffés non homogènes, implantation semi-enterrée, etc.

- Les trois logiciels ne permettent pas une saisie précise de certains modes constructifs rencontrés dans ces logements anciens: parois composites horizontales et verticales, ponts thermiques, etc. Les modes constructifs proposés par 3CL sont les plus simples, mais ne sont parfois pas adaptés. Les logiciels CW et ECPro proposent une saisie personnalisée des éléments constructifs particuliers, mais cette saisie reste parfois encore imprécise et peut demander plusieurs heures.

- Les parois opaques sont saisies avec 3CL sans difficulté lorsque les géométries et les composants sont simples. Mais, souvent l'enveloppe des logements anciens est complexe et ses caractéristiques ne peuvent pas être saisies avec justesse et fidélité. Les deux logiciels CW et ECPro proposent des saisies personnalisées. Les bases de données de matériaux et de composants sont plus complètes avec 3CW, mais elles ne répondent pas aux situations rencontrées avec les logements anciens. Il est parfois difficile d'identifier les composants de l'enveloppe du logement ancien, et plus difficile de préciser leurs propriétés thermiques. La saisie personnalisée des composants de parois, non définis dans les bases de données, peut demander plusieurs heures.

- Les ouvertures sont saisies avec 3CL, sans pouvoir indiquer les caractéristiques particulières: volets dans l'embrasure, ponts thermiques, défauts de perméabilités, etc. Les bases de données des

menuiseries sont plus importantes avec CW, mais les menuiseries et les vitrages spécifiques des logements anciens ne sont pas disponibles.

- Les spécificités techniques des équipements rencontrés dans les logements anciens ne sont pas saisies par 3CL. Les diagnostics ne fournissent pas les informations nécessaires pour renseigner les saisies des données d'entrée avec CW. Les bases de données sont également incomplètes, et l'identification par la référence commerciale de l'équipement de CW n'est pas adaptée. Les réseaux de chauffage et ECS sont difficiles à saisir en raison de leurs diversités, et nécessitent de redessiner les plans pour définir les schémas de distribution et préciser les caractéristiques techniques. La multiplication des sources d'énergie et des systèmes de chauffage (cheminée, chauffage d'appoint, etc.) ne permet pas une saisie précise des équipements, alors que les résultats avec les 3 logiciels sont parfois très sensibles à la définition des équipements.

- Les informations relatives aux occupants et aux niveaux de confort ne sont pas saisies avec 3CL. Le logiciel CW s'appuie sur la RT 2000 et ne prend pas en compte les capacités d'adaptation des logements et des occupants dans leurs environnements. La caractérisation des conditions thermiques estivales avec la température intérieure conventionnelle n'est pas adaptée aux logements anciens étudiés. Le questionnaire électronique proposé par ECPro permet une meilleure prise en compte des interactions entre les occupants et leur logement.

Le logiciel 3CL ne permet pas une saisie précise des données d'entrée spécifiques aux logements anciens. Les données de sortie et les résultats montrent que les versions 11 et 14 de 3CL ne sont pas adaptés à l'évaluation précise des performances énergétiques des logements anciens étudiés.

Le logiciel CW offre une saisie des données d'entrée plus détaillées, mais les bases de données ne sont pas adaptées aux spécificités des logements anciens. Les résultats montrent parfois des écarts importants avec les données des consommations recueillies lors des diagnostics. Les modes constructifs spécifiques aux logements anciens, influençant les phénomènes thermiques dynamiques, ne sont pas explicitement pris en compte. Les résultats montrent la difficulté de la version 3.2 de CW à considérer précisément les performances thermiques des logements anciens.

Le logiciel ECPro propose une saisie des données d'entrée plus simple que CW, avec une prise en compte plus précise des caractéristiques thermiques de chaque logement ancien. Il a permis des évaluations plus précises des performances énergétiques. Néanmoins, la version provisoire ECPro, utilisée dans cette étude, n'offre pas une base de données adaptées au logement ancien. ECPro reste à développer et doit être validé.

6.3 Perspectives de l'étude : la création d'un modèle physique adapté au bâti ancien...

La présente étude met tout d'abord en perspective les risques de réhabilitations thermiques des bâtiments anciens qui reposeraient exclusivement sur :

- Des critères d'évaluation et des modèles de calculs conçus pour des bâtiments neufs,
- Des techniques d'isolation et des matériaux contemporains dont la comptabilité n'est pas assurée pour un bâtiment ancien, au comportement dit « respirant ».

Les principaux risques encourus étant les suivants :

- Des qualités hygrothermiques intrinsèques du bâti pourraient être détruites ;
- La "rentabilité financière" des investissements réalisés ne serait pas comparable à celle des bâtiments neufs ;
- Des pathologies pourraient se développer, réduisant éventuellement l'espérance de vie de certains bâtiments.

La présente étude soulève aussi et surtout la question de la modélisation du comportement thermique du bâti ancien, non satisfaisante pour les moteurs de calcul actuels.

Dans cette optique, un nouveau modèle physique pourrait être développé, adapté aux spécificités du bâti ancien. Dans une approche systémique, ce modèle devrait notamment répondre aux problématiques suivantes, qui restent posées pour le bâti ancien :

- La caractérisation des propriétés hygrothermiques des matériaux anciens (caractérisation de la conductivité, de la diffusivité, de la capacité thermique ...)
- La caractérisation des ponts thermiques des modes constructifs anciens,
- La caractérisation des espaces tampons et autres dispositifs bioclimatiques : cas des serres thermiques, des doubles fenêtres,
- La caractérisation du phénomène d'inertie,
- La caractérisation du phénomène de ventilation naturelle et de renouvellement d'air dans le bâti ancien
- La caractérisation des modes d'occupation.

A terme, un tel modèle physique pourrait être intégré dans les méthodes réglementaires (horizon RT existant 2010 ou 2013) mais aussi dans des méthodes d'évaluation simplifiées (de type diagnostic de performance énergétique DPE) ou encore d'aide à la conception.

7 TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Consommation d'énergie finale par secteur d'activités, en France - 2006 (source : Observatoire de l'Énergie – DGEMP).....	6
Figure 2 : Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France - 2006 (source : ADEME).....	6
Figure 3 : Répartition des consommations énergétiques des bâtiments / confusion des bâtiments construits avant 1975 – Source INSEE 2003	9
Figure 4 : Schéma présentant les évolutions non parallèles des réglementations thermiques (flèche supérieure) et des modes constructifs (flèche inférieure).....	9
Figure 5 : Répartition du nombre de logements existants, par année de construction, en 2002 (source MELTLM – compte logement)	10
Figure 6 : Répartition géographique des bâtiments du panel d'étude.....	14
Figure 7 : Schéma de mise en place des enregistreurs de température et d'humidité dans les logements :	17
Figure 8 : Synthèse des performances énergétiques réelles des bâtiments diagnostiqués	24
Figure 9 : Comparaison des consommations réelles et des consommations simulées sous 3CL.....	
Figure 10 : Comparaison des consommations réelles et des consommations simulées sous ClimaWin.....	27
Figure 11 : Comparaison des consommations réelles et des consommations simulées sous EPro.....	28
Figure 12 : Comparaison synthétique des consommations réelles et des consommations simulées sous les différents logiciels.....	29
Figure 13 : Comportement thermique d'été in situ : comparaison des températures extérieures maximales et intérieures maximales pour les différents bâtiments du panel.....	30
Figure 14 : Comparaison des valeurs de Tic simulée et de la température résultante intérieure maximale mesurée in situ, pour chacun des bâtiments du panel.....	31
Figure 15 : Vue aérienne d'un îlot urbain haussmannien caractéristique (cas du bâtiment 2).....	33
Figure 16 : photos de la façade Sud en été et en hiver (emploi d'une végétation à feuillage caduc)	34
Figure 17 : coupe Sud – Nord sur le bâtiment et caractéristiques d'implantation.	34
Figure 18 : Analyse de la dépendance du comportement thermique des bâtiments vis-à-vis du contexte extérieur : coefficients de corrélation linéaire entre T(int) et T(ext), en période de mi-saison (comportement libre, sans la variable chauffage).....	35
Figure 19 : Analyse de l'organisation intérieure du bâtiment 2 : plan traversant, refend intérieur en briques (e=50cm), emplacement des pièces de vie sur rue (zone ensoleillée), des pièces de service sur cour.	38
Figure 20 : Coupe générale et de détail sur la liaison plancher – façade du bâtiment 2.....	41
Figure 21 : cas d'un plancher simple à poutres encastrées apparentes (bâtiment 7).....	42
Figure 22 : cas d'un plancher complet :poutres encastrées, enfermées dans un caisson en plâtre (bâtiment 3).....	42

Figure 23 : Coefficients de corrélation linéaire entre humidité intérieure et extérieure, en période de mi-saison, pour chaque bâtiment du panel.....	46
Figure 24 : comparaison entre T(surface mur) en rose et T(rosée) en bleu, en différentes saisons (cas du bâtiment 10).....	47
Figure 25 : protection contre les remontées capillaires dans la cave du bâtiment 2.....	48
Figure 26 : Mise en évidence, par thermographie infrarouge de l'hétérogénéité de l'enveloppe : soubassement en pierre ; étage en pans de bois + torchis ; toiture en chaume (bâtiment 10)	49
Figure 26 : Évolution des températures extérieures et intérieures lors de deux journées types d'été (28 et 29 juin 2005 – bâtiment 7) : mise en évidence du phénomène d'inertie et du confort d'été résultant.....	50
Figure 27 : Menuiseries bois – simple vitrage, présentant des défauts d'étanchéité à l'air importants (bâtiment 5)...	53
Figure 28 : Coupe verticale sur une double fenêtre (bâtiment 2).....	54
Figure 29 : Exemple de bow window sur les immeubles anciens	54
Figure 30 : Évolution de la température intérieure et scénario d'occupation pendant une journée type d'hiver (5 et 6 décembre 2005 - bâtiment 2)	60
Figure 31 : Comparaison des valeurs de Tic simulée et de la température résultante intérieure maximale mesurée in situ, pour chacun des bâtiments du panel.....	61

8 BIBLIOGRAPHIE

8.1 Bibliographie générale

ANAH, *Guide de prévention et de lutte contre les mérules / Recommandations pour une réhabilitation durable*, ANAH, 2006

COIGNET, *La maison ancienne, construction, diagnostic, interventions*, Ed. Eyrolles, 2004

COURGEY et OLIVA, *La conception bioclimatique, des maisons confortables et économes*, Ed. Terre Vivante, 2006

DGEMP – Observatoire de l'Énergie, *Bilan énergétique de la France en 2006*, 5 avril 2007

DGEMP – Observatoire de l'Énergie, *Les émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie*, Novembre 2006

DGUHC, *Diagnostic de performance énergétique – guide à l'usage du diagnostiqueur*, Février 2007

Maisons Paysannes de France, *Revue n°161 – la maîtrise de l'énergie dans nos maisons anciennes*, Automne 2006.

OLIVA, *L'isolation écologique, conception, matériaux, mise en œuvre*, Ed. Terre Vivante, 2001

SIDLER, *Guide du logement à faible consommation énergétique*, ADEME – 2000

8.2 Textes officiels

Directive 2002/91/CE du parlement européen et du conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments.

Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations en matière de politique énergétique.

Décret 2007-363 du 19 mars 2007 relatif aux études de faisabilité des approvisionnements en énergie, aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants et à l'affichage du diagnostic de performance énergétique (J.O. du 21 mars 2007)

Décret n°2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions (J.O du 25 mai 2006)

Décret n°2006-1114 du 5 septembre 2006 relatif aux diagnostics immobiliers et modifiant le code de la construction et de l'habitation et le code de la santé publique (J.O. du 7 septembre 2006)

Décret n°2006-1147 du 14 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique et à l'état de l'installation intérieure de gaz pour certains bâtiments (J.O. du 15 septembre 2006)

Décret n° 2007-363 du 19 mars 2007 relatif aux études de faisabilité des approvisionnements en énergie,

aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants et à l'affichage du diagnostic de performance énergétique (J.O du 31 mars 2007)

Arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine

Arrêté du 15 septembre 2006 relatif aux méthodes et procédures applicables au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine

Arrêté du 16 octobre 2006 définissant les critères de certification des compétences des personnes physiques réalisant le diagnostic de performance énergétique et les critères d'accréditation des organismes de certification (J.O. du 27 octobre 2006)

Arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine (en cours de publication aux Bulletins Officiels)