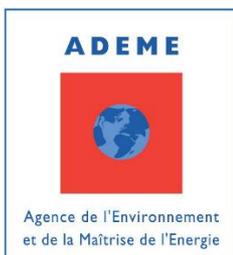


Projet : LowCal, étude du premier bâtiment E4C2 pour massifier la réalisation, à coût maîtrisé, du bâtiment à énergie positive, bas carbone, low-tech, local et sans chauffage

Tâche 1 : Low-Tech

Sous-tâche 1.3 : Retour d'expérience par STD en vue de la généralisation

Etude réalisée par ENERTECH avec le soutien de l'ADEME, dans le cadre de son appel à projet recherche « vers les bâtiments responsables à l'horizon 2020 »



Coordination technique ADEME:

Romuald CAUMONT

romuald.caumont@ademe.fr

01 47 65 21 49

Version	Rédigé par	Relu par	Date
1	FB, LF	ChP	27/07/2020

Plan du rapport :

1	ENJEUX DE MODELISATION	3
1.1	MODELISER DES BATIMENTS THERMIQUEMENT PERFORMANTS	3
1.2	CALIBRER UN MODELE	3
1.2.1	<i>Cas réel</i>	3
1.2.2	<i>Sorties temporelles</i>	4
2	MODELISATION DU LOWCAL	5
2.1	CALIBRATION DU MODELE	5
2.1.1	<i>Comparaison d’outils de simulation</i>	5
2.1.2	<i>Points cruciaux de la modélisation</i>	6
2.1.3	<i>Validation de la modélisation</i>	8
2.1.4	<i>Impacts du comportement hygro-thermique</i>	13
2.2	CHIFFRE-CLES	17
2.2.1	<i>Caractéristique du bâti</i>	17
2.2.2	<i>Bilans énergétiques</i>	22
2.2.3	<i>« Techniques » de rafraichissement</i>	23
3	CONTRIBUTIONS DE LA MODELISATION DU LOWCAL	24
3.1	ENJEUX DE MODELISATION	24
3.2	ENJEUX POUR LES CAMPAGNES DE MESURES	24
3.3	BESOIN DE METHODES DE CALIBRATION ADAPTEES	26
3.4	DIFFUSION D’UN CAS D’ETUDES	26
4	ANNEXE : RAPPORT DE MODELISATION DU LOWCAL	27
4.1	PRESENTATION DU BATIMENT	27
4.1.1	<i>Description globale</i>	27
4.1.2	<i>Instrumentation</i>	28
4.1.3	<i>Outil de modélisation/simulation</i>	28
4.2	ZONAGE	28
4.3	COMPOSITION DU BATIMENT	30
4.3.1	<i>Parois opaques</i>	30
4.3.2	<i>Menuiseries</i>	31
4.3.3	<i>Ponts thermiques</i>	31
4.4	SOLLICITATIONS	32
4.4.1	<i>Données météorologiques</i>	32
4.4.2	<i>Masques solaires</i>	32
4.4.3	<i>Apports internes</i>	33
4.5	REGIME DE FONCTIONNEMENT	33
4.5.1	<i>Renouvellement d’air</i>	33
4.5.2	<i>Chauffage</i>	34
4.5.3	<i>Occultations solaires</i>	34

1 Enjeux de modélisation

Suite à la description du bâtiment (ST 1.1) et à la Campagne de Mesure sur les performances réelles (ST 1.2), le présent rapport s'intéresse à la modélisation du bâtiment par Simulation Thermique Dynamique (STD).

Cet outil, utilisé dès les premières phases de la conception du bâtiment, représente l'outil de prédilection pour tester le comportement thermique du LowCal dans d'autres configurations, de façon virtuelle. Il convient toutefois de valider la capacité du modèle à reproduire la réalité. Mais le LowCal, grâce à son importante instrumentation, s'y prête particulièrement bien.

Par ailleurs, la STD s'avère indispensable pour analyser le comportement de ce type de bâtiment fonctionnant par nature de façon dynamique (gestion journalière et saisonnière des apports solaires notamment) principalement en évolution libre (pas ou peu de système permettant de maintenir une température de consigne).

Enfin, la STD permet aussi d'accéder à des grandeurs non instrumentées et d'enrichir ainsi les connaissances sur le fonctionnement du bâtiment.

L'objectif du présent rendu est donc triple :

- d'une part de prouver que l'outil de STD est fiable et robuste ;
- d'autre part d'étudier le comportement énergétique particulier du LowCal ;
- et enfin de le caractériser sous différents aspects.

Cette calibration est en soi un retour d'expérience passionnant, et il permet également d'appuyer l'étude de généralisation du concept LowCal à d'autres climats et d'autres usages (ST 5.2) sur des bases robustes.

1.1 Modéliser des bâtiments thermiquement performants

Bien que considéré comme l'outil le plus adapté à l'étude des bâtiments thermiquement performants, la STD s'avère rencontrer des limites pour les modéliser. En effet, les premières générations de STD étaient conçues pour modéliser des bâtiments fortement déperditifs. Dans le cas des bâtiments thermiquement performants, une attention plus fine doit notamment être portée à la prise en compte de l'inertie¹, notamment son interaction avec les flux solaires transmis (suivi de la tâche solaire, valeur des coefficients d'échange, etc.) et des ponts thermiques² dont les contributions relatives s'avèrent beaucoup plus importantes.

La modélisation des bâtiments thermiquement performants nécessite donc un niveau de détail plus important.

1.2 Calibrer un modèle

1.2.1 Cas réel

La STD est généralement exploitée pour comparer des variantes constructives ou architecturales, notamment en phase conception. Elle est plus rarement utilisée pour reproduire le comportement réel

¹ Munaretto, Fabio (2014). "Etude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments". Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

² Bontemps, Stéphanie (2015). "Validation expérimentale de modèles : application aux bâtiments basse consommation". Thèse de doctorat. Université de Bordeaux.

d'un bâtiment. Dans le premier cas, l'objectif est de se rapprocher de la réalité, d'avoir un modèle représentatif, prenant en compte de façon réaliste les différentes contributions des phénomènes physiques, pour étudier l'influence relative des différentes variantes. Une modélisation exacte du comportement réel n'est pas nécessaire, et de toute façon bien souvent inatteignable par manque d'information (occupations, charges internes, etc.). En revanche, reproduire le comportement d'un bâtiment réel représente un exercice plus délicat, car il est nécessaire de connaître le plus précisément possible l'ensemble des caractéristiques géométriques et physiques du bâtiment pour s'y rapprocher autant que possible. Les données de construction peuvent généralement être connues de façon très précise, mais l'impact du comportement des occupants, par nature aléatoire, est difficilement prédictible et modélisable. Il représente donc une inconnue qui peut entraîner une forte incertitude, notamment dans les bâtiments thermiquement performants.

L'instrumentation des usages électriques du LowCal, en plus de la connaissance détaillée de sa géométrie et de ses constituants, représente donc un atout majeur pour calibrer le modèle.

1.2.2 Sorties temporelles

Les méthodes de calibration consistent à modifier les valeurs des paramètres initiaux du modèle de sorte que les résultats de simulation correspondent aux mesures. La « correspondance » est estimée à l'aide d'écartés entre grandeurs scalaires³, telles que la consommation annuelle par exemple.

L'ajustement des valeurs peut se faire manuellement, en jouant sur les paramètres que le modélisateur sait d'expérience être les plus influents. De façon plus exhaustive il est possible d'effectuer cette tâche en testant numériquement de multiples combinaisons de paramètres, de sorte à déterminer le meilleur jeu de paramètres. De façon plus poussée, en définissant une marge d'incertitude, il peut être possible d'obtenir plusieurs jeux de paramètres probables.

Ces méthodes, bien que plus précises et efficaces, peuvent toutefois s'avérer très lourdes à mettre en place.

Dans le cas du LowCal, et plus généralement des bâtiments passifs, le comportement du bâtiment est mieux décrit par l'évolution des températures intérieures de celui-ci (et non pas son besoin de chauffage ou de refroidissement). On cherchera donc à faire correspondre des séries temporelles (généralement estimées au pas de temps horaire) entre simulations et mesures.

Les outils de modélisation/simulation ne sont généralement pas adaptés à ce type de contrainte. On pourrait toutefois se rapporter à des indicateurs scalaires tels que l'écart simultané maximal entre les séries temporelles par exemple. Mais cette possibilité est rarement disponible dans les outils courants.

Enfin, tous les paramètres à ajuster ne sont pas non plus tous scalaires, notamment les scénarios d'ouverture des fenêtres ou l'évolution des charges internes par exemple. Ce qui limite encore l'utilisation de ce type de méthode.

³ C'est-à-dire une grandeur représentée par une unique valeur, par opposition à une grandeur vectorielle, représentée par une série de valeurs (par exemple l'évolution de la puissance au pas de temps horaire sur une année).

2 Modélisation du LowCal

Les hypothèses retenues pour la modélisation du LowCal sont données en annexe. Seules les étapes de calibration sont présentées ici.

2.1 Calibration du modèle

2.1.1 Comparaison d’outils de simulation

Pour modéliser le LowCal, deux outils de simulation thermique dynamique (STD) ont été utilisés, dans le but de vérifier l’absence de biais de modélisation liés à ceux-ci, mais aussi afin d’utiliser certaines potentialités spécifiques. Cette démarche a permis au passage de comparer ces deux outils (voir figures ci-dessous).

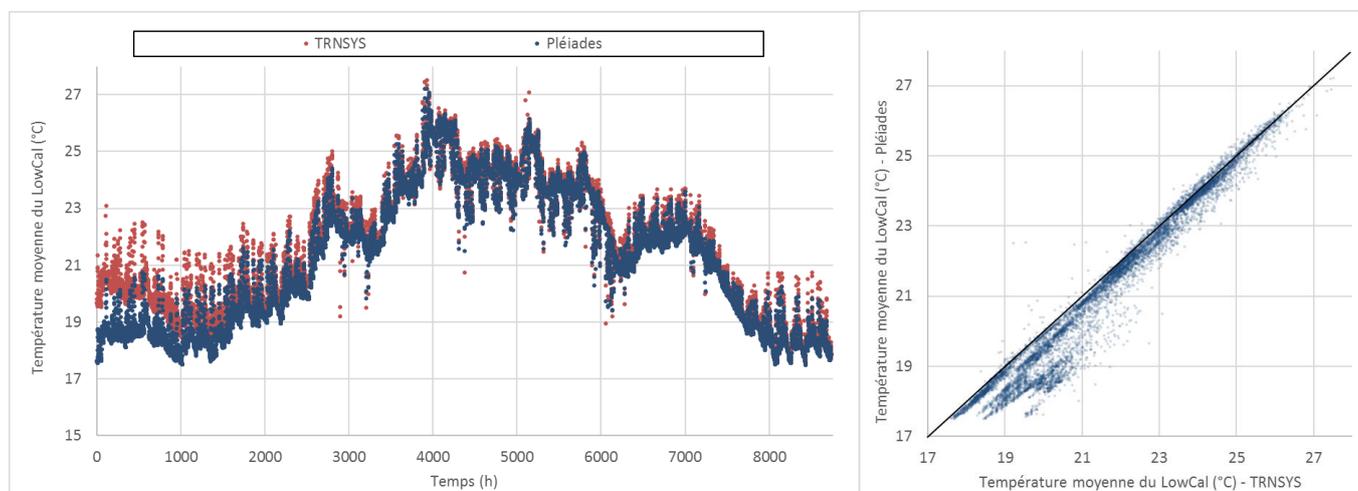


Figure 2.1.1.a – Comparaison des résultats des deux outils de simulation.

Sur la figure de droite, chaque point correspond à un pas de temps. Leur abscisse correspond à la valeur estimée par le premier modèle et leur ordonnée à l’estimation du second modèle pour un pas de temps donné. Si les résultats étaient identiques tous les points seraient sur la diagonale. Si les points sont en dessous de la diagonale c’est que le premier modèle surestime les résultats par rapport au second et réciproquement.

Les deux outils retenus sont TRNSYS⁴ et Pléiades⁵. Le premier a permis d’étudier plus en détail le comportement hygro-thermique du bâtiment grâce à sa modélisation dédiée (voir 2.1.4), tandis que le module aéraulique du second a permis d’affiner la prise en compte de l’aération (voir 2.1.2 Aération).

Il s’est avéré qu’une fois les hypothèses de modélisation ajustées pour être cohérentes d’un modèle à l’autre, les résultats de simulation obtenus, hors période d’initialisation, sont tout à fait semblables (voir figure 2.1.1.a), et ce même au pas de temps horaire. L’écart moyen est de 0,5°C. Celui-ci est jugé négligeable et peut être attribué aux différences d’implémentation des modèles (voir tableau ci-dessous).

Élément	Modélisation TRNSYS	Modélisation Pléiades	Remarque /TRNSYS
Apports internes	Moitié convectif, moitié radiatif.	Uniquement convectif, mais sur température opérative.	Modélisation quasiment équivalente.

⁴ <http://www.trnsys.com/>

⁵ <http://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/>

Coefficient de convection	Défini par le modélisateur.	Pris en compte dans un coefficient d'échange superficiel global (radiatif + convectif).	A priori même ordre de grandeur et impact mineur pour un bâtiment très bien isolé.
Echanges grande longueur d'onde	Modèle « star network ». Pour l'extérieur, la température de ciel est spécifiquement prise en compte.	Linéarisé. Pris en compte dans un coefficient d'échange superficiel global (radiatif + convectif). La température de ciel est approximée par la température extérieure.	Impact mineur pour un bâtiment très isolé.

Figure 2.1.1.b – Comparaison des hypothèses de modélisation divergentes majeures entre les deux outils de simulation.

Pour les études suivantes, mis-à-part l'étude du comportement hygrothermique, seul le modèle Pléiades a été retenu, notamment pour son interface unique comprenant les modules RT-2012 et ACV, utiles pour les autres tâches du projet.

2.1.2 Points cruciaux de la modélisation

L'influence des principales hypothèses de modélisation permettant de rapprocher les résultats de simulations avec les mesures est donnée dans cette section. Les différents résultats sont affichés dans la figure 2.1.2.a. Les codes couleurs sont rappelés dans le descriptif de chaque hypothèse. Les données de mesures sont représentées en rouge au premier plan.

Ne sont présentées ici que les variables du modèle les plus incertaines et non les plus sensibles. Nous sommes partis du principe que les informations obtenues à partir des fiches constructeurs et du DOE étaient suffisamment fiables, et nous nous sommes en conséquence concentrés que sur les variables moins bien connues. D'autres variables que celles présentées dans la suite peuvent être influentes (telles que les résistances thermiques, les caractéristiques des vitrages, etc.) mais, dans notre cas, pour la modélisation d'un bâtiment dont on connaît la conception, elles ne représentent pas en théorie un enjeu.

Ponts thermiques

Les ponts thermiques mineurs ont été évalués à partir des règles Th-U et les ponts thermiques les plus impactants ont été calculés avec le logiciel conducteö. Toutefois ce logiciel s'est avéré limité pour l'estimation des ponts-thermiques en contact avec le sol, alors que ceux-ci se sont avérés très influents sur les résultats de simulation. Afin de mieux coller aux résultats, il a finalement été retenu de diviser les valeurs de ces ponts thermiques par 2 (voir rapport de modélisation).

Par ailleurs, il convient de souligner que dans les outils de STD, les ponts thermiques sont modélisés uniquement de façon statique. L'influence de leur comportement dynamique aurait tendance à réduire leur déperdition, grâce aux phénomènes d'amortissement et de déphasage, ce qui va dans le sens de la modification effectuée. Ceci est d'autant plus vrai lorsque la condition limite concerne le sol, car son comportement thermique complexe est aussi fortement simplifié.

L'impact de cette modification n'apparaît pas dans la figure 2 car celle-ci a été réalisée en amont de la comparaison des deux outils.

Initialisation

Comme on peut l’observer dans les résultats, la période d’initialisation a un impact non négligeable en début de simulation (passage du modèle initial « Pléiades_0 » en violet au modèle « Pléiades_initialisation » en bleu foncé). En effet, par défaut, le bâtiment est initialisé avec les séquences météorologiques des 4 semaines précédant la période de simulation, et, étant en évolution libre, c’est-à-dire sans chauffage ni climatisation, la température résultante vaut approximativement la température extérieure moyenne sur cette période. Dans le cas d’étude, l’initialisation a lieu en hiver, le bâtiment ne profite donc pas des apports stockés en été et en intersaison. Pour les prendre en compte il convient d’augmenter la période d’initialisation. En définitive, la période d’initialisation a été fixée à 20 semaines.

Ce point met en avant la sensibilité des bâtiments passifs à leur historique de température (inertie inter-saisonnière).

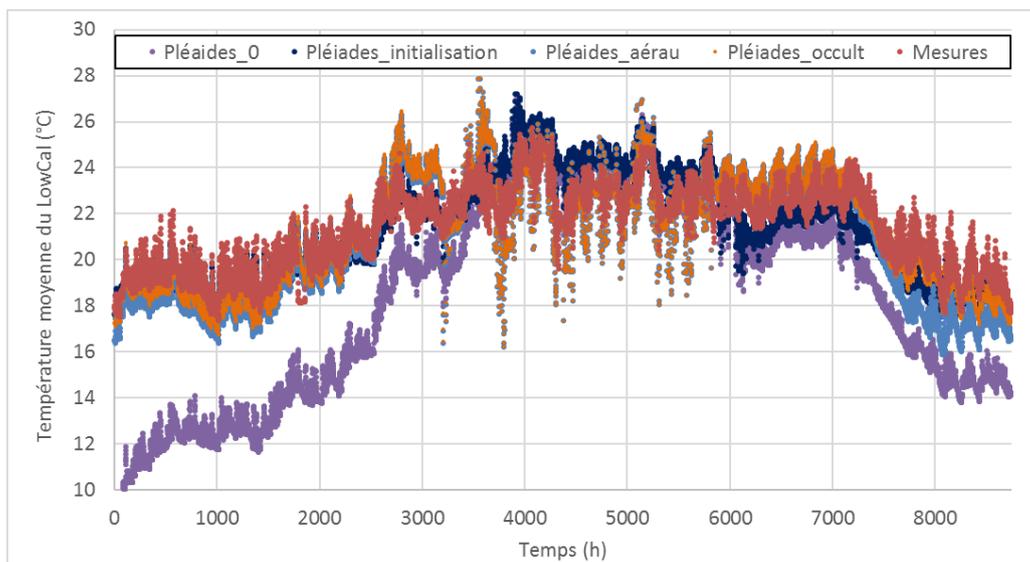


Figure 2.1.2.a – Influence des principales hypothèses de modélisation.

Aération naturelle

Comme le montre les résultats, notamment en période estivale au niveau des descentes de température nocturne, l’utilisation du module aéraulique de Pléiades permet de modéliser de façon plus réaliste (dépendant des conditions de vent notamment) les débits d’aération occasionnés par les ouvertures des fenêtres (courbe « Pléiades_aérou » en bleu clair), que l’utilisation de valeurs forfaitaires constantes comme cela est fait avec TRNSYS.

L’aération naturelle est en effet un point clé de la gestion thermique du bâtiment : l’évacuation des calories absorbées en journée est indispensable pour maintenir la température du bâtiment à un niveau confortable. Sa modélisation plus fine est donc un atout pour une meilleure reproduction de la réalité.

	TRNSYS	Pléiades (module aéraulique)		
		Min	Max	Moy.
Aération inter-saison (vol/h)	5	4	37	24
Aération matinale (vol/h)	10	8	47	24
Aération nocturne (vol/h)	6	1	20	8
Aération intra-étage (m³/h)	30	0	450	170

Aération inter-étages (m ³ /h)	30	0	350	60
---	----	---	-----	----

Figure 2.1.2.b – Comparaison des débits de ventilation naturelle selon les modèles.

Les scénarios d'ouverture des fenêtres sont théoriques et leur période d'utilisation ont été ajustés lors de la calibration. L'ouverture réelle des différentes fenêtres est inconnue précisément et constitue un enjeu majeur pour la modélisation.

Occultations solaires

L'un des paramètres qui a montré son importance lors de la calibration du modèle est le scénario d'occultations solaires. Les périodes d'ouverture et de fermeture initiales ont été modifiées (courbe « Pléaide_occult » en orange) au niveau des périodes où manifestement les occultations étaient en réalité en place (surestimation du modèle) et inversement (sous-estimation du modèle).

De la même façon que pour l'ouverture des fenêtres, le scénario de gestion des occultations solaires est établi de façon théorique, selon un planning représentatif des usages courants, mais là aussi leur utilisation exacte est inconnue. Etant donné la sensibilité du bâtiment à son usage, le scénario d'occultations solaires apparaît clairement comme un enjeu majeur pour la modélisation.

2.1.3 Validation de la modélisation

Sélection des zones exploitables pour la validation du modèle

Afin de valider le modèle de simulation avec des mesures fiables, toutes les mesures de température des bureaux ont été analysées et seules les mesures entièrement valides sur la période d'étude (mai 2017-mai 2018) ont été retenues. De même, pour valider le modèle, le degré de fiabilité des apports internes de chaque zone a été étudié. Ainsi 2 zones d'études ont été retenues pour la validation du modèle de simulation : la zone 12 (bureau au rez-de-chaussée Nord) et la zone 17 (bureau au R+1 Sud).

Le tableau ci-dessous reprend les analyses des mesures et leur fiabilité pour chaque zone. En vert la mesure est fiable sur toute la période, en vert clair il peut y avoir quelques données erronées ou des reconstitutions peu impactantes sur les apports internes, en orange des données liées à l'occupation ont dues être reconstituées et en rouge il y a des plages importantes de données manquantes ou erronées.

Les zones sélectionnées pour la validation du modèle sont les bureaux avec le plus de vert possible.

Zone	Hiver (Novembre - Mars)		Mi saison 1 (Avril)		Été (Mai - Septembre)		Mi saison 2 (Octobre)	
	Apports internes	Température	Apports internes	Température	Apports internes	Température	Apports internes	Température
Zone1_CommunsR DJ_Archives	NA		NA		NA		NA	
Zone2_Grande_Reunion								
Zone3_Atelier								
Zone4_Accueil								
Zone5_CommunsR DC								
Zone6_Refectoire								
Zone7_Reunion								
Zone8_Visio								
Zone9_Bureaux_Sud RDC								
Zone10_OpenSpace Sud_RDC								
Zone11_Bureau_Nord Ouest_RDC								
Zone12_Bureau_Nord RDC								
Zone13_Communs Etage								
Zone14_Serveur_Or dinateur								
Zone15_Repro								
Zone16_Bureaux_I noc_Etage								
Zone17_Bureau_Sud Etage								
Zone18_OpenSpace Sud_Etage								
Zone19_OpenSpace Nord_Etage								
Zone20_Bureau_Nord Etage								

Figure 2.1.3.a – Fiabilité des mesures de température et des apports internes de chaque zone.

Comparaison mesures-résultats de simulations

Validation en température

En complément de la comparaison globale à l'échelle du bâtiment (température moyenne) vue précédemment, nous nous intéressons ici de façon plus détaillée à la validité du modèle à une échelle plus réduite, pour les deux zones sélectionnées pour la fiabilité de leurs mesures.

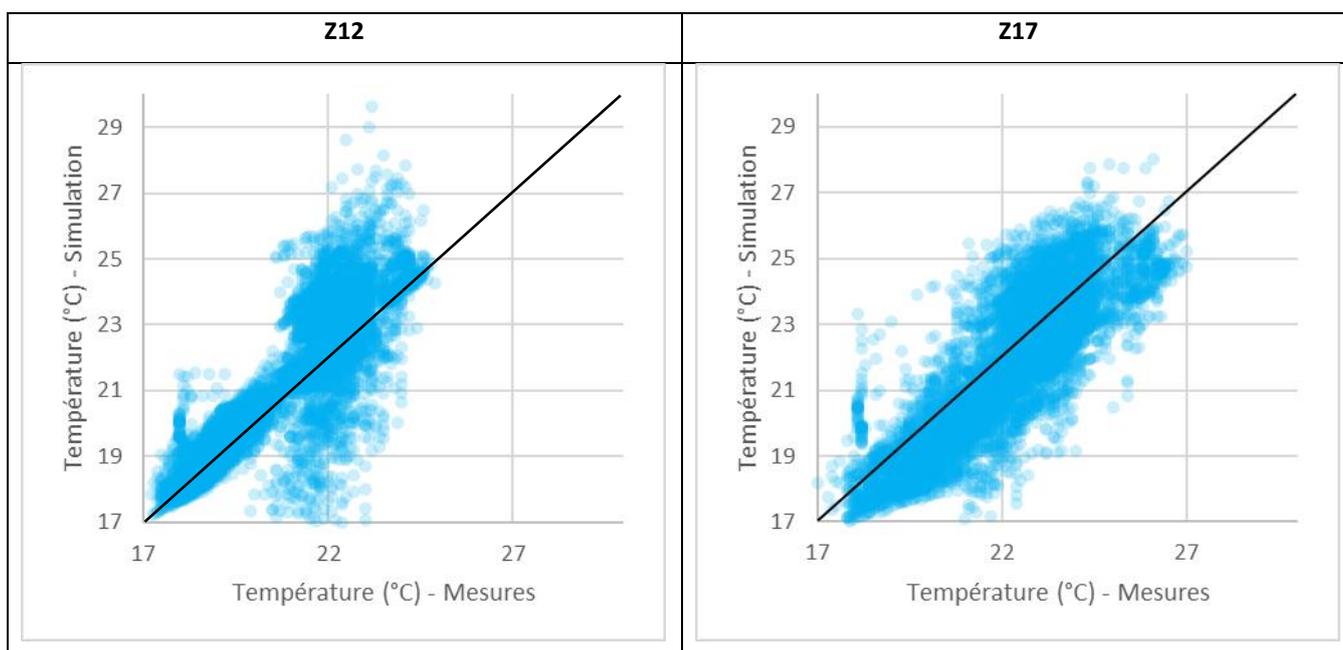
Traitant des séries temporelles, il existe une infinité de manière pour comparer les mesures et les résultats de simulations pour les deux zones sélectionnées. Pour cela, nous avons retenu 3 indicateurs scalaires et 2 représentations graphiques (tableau ci-dessous).

On observe ainsi qu'en moyenne, le modèle reproduit bien le comportement réel avec une erreur moyenne inférieure à 0,5°C. Localement, sur certains pas de temps, des erreurs plus importantes peuvent

apparaître, comme pour la zone 12 où l’on voit que la simulation suppose une ouverture des fenêtres à des moments où cela ne l’était manifestement pas (la température mesurée reste autour de 22°C quand celle simulée descend à 17°C). Toutefois comme l’indique l’écart type, le coefficient de détermination et le premier graphique, le modèle reproduit convenablement les tendances globales.

Pour les deux zones, les écarts (figure 2.1.3.b) s’observent principalement en été et en mi-saison, lorsque les occultations et l’aération sont utilisées. Il s’expliquent par l’importante sensibilité du modèle à celles-ci, comme mis en évidence précédemment, couplées à leur relative incertitude. En mi-saison, l’échauffement tendanciel du modèle par rapport à la réalité traduit probablement une sous-estimation de l’utilisation des occultations et/ou une sous-estimation du rafraîchissement par aération naturelle. En été, les écarts apparaissent surtout la nuit, lors de l’aération naturelle, et montrent les limites de la modélisation aéraulique pour prendre en compte précisément en terme de température instantanée ce phénomène. Notons toutefois que l’énergie évacuée par la ventilation nocturne semble au final bien estimée, étant donné les écarts très faibles en journée. Enfin, en hiver, le modèle semble légèrement sous-estimer la température la nuit et la surestimer le jour. Ces dynamiques peuvent être liées à une sous-estimation de l’inertie journalière ou à l’ignorance du comportement hygroscopique du refend en terre crue (voir 132.1.4).

	Zone 12	Zone 17
Ecart moyen (°C)	0,43	-0,38
Ecart-type (°C)	1,24	1,21
Coefficient de détermination ⁶	0,70	0,72



Sur ces figures, chaque point correspond à un pas de temps. Leur abscisse correspond à la valeur mesurée et leur ordonnée à l’estimation de la simulation pour un pas de temps donné. Si les résultats étaient identiques tous les points seraient sur la diagonale. Si les points sont en dessous de la diagonale c’est que le modèle sous-estime les résultats par rapport à la réalité et réciproquement.

⁶ Mesure de la qualité de la prédiction d’une régression linéaire. Plus le coefficient est proche de 1, plus la relation linéaire entre les variables est forte.

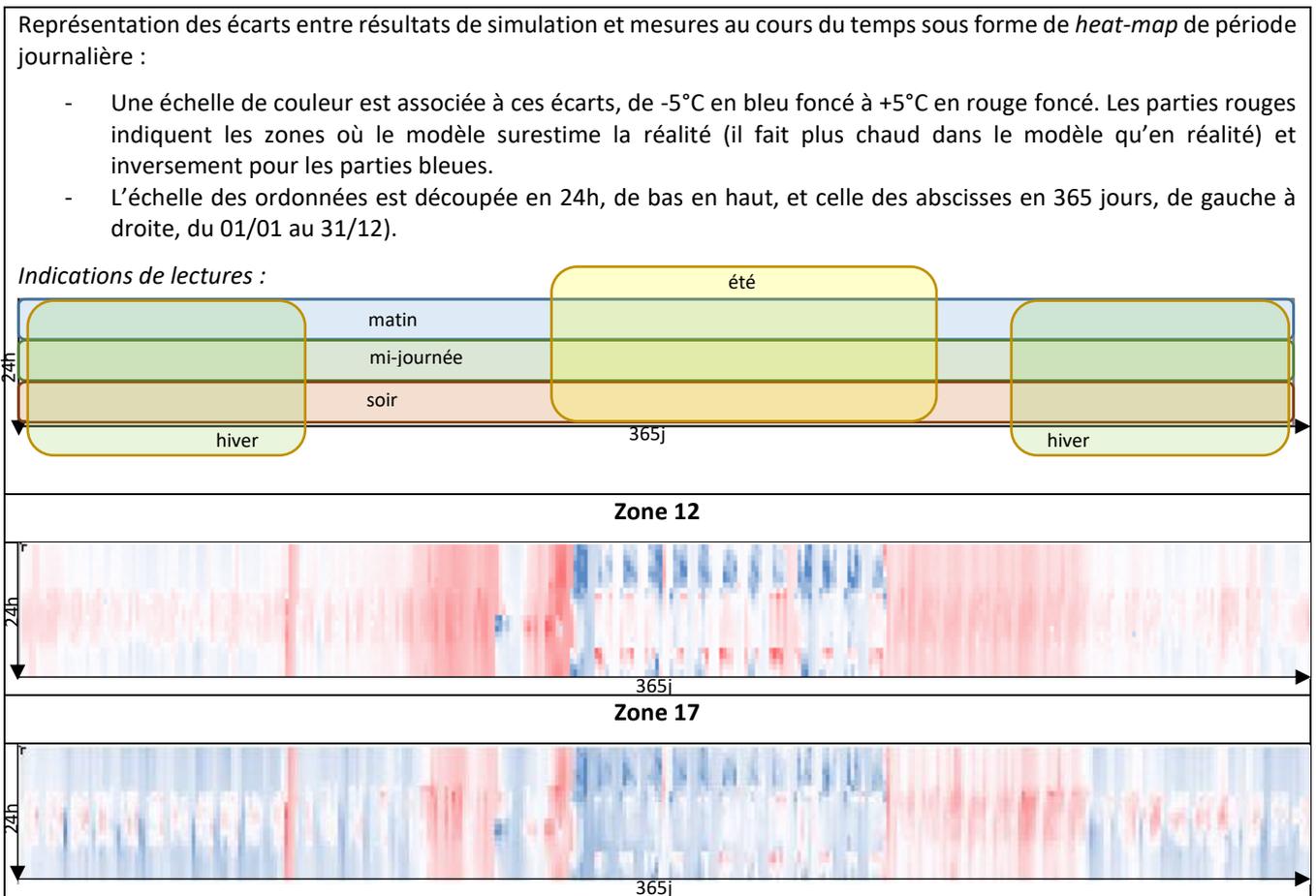


Figure 2.1.3.b – Comparaisons mesures-résultats selon différentes représentations.

Validation en consommation

En complément de cette validation en température, pour consolider la validation du modèle, nous avons souhaité valider celui-ci en consommation de chauffage, notamment parce que les modèles de STD sont originellement conçus pour l'estimation de celle-ci et indirectement seulement pour l'estimation de la température.

Cependant, dans notre cas, la puissance dégagée par les convecteurs électriques est incluse dans les apports internes du rez-de-chaussée. De plus, sa régulation sur la température interne de la masse thermique (intérieur d'un refend en terre crue), ne permet pas de la modéliser facilement.

Pour parvenir à l'estimer tout de même malgré ces contraintes, nous avons retranché la puissance des convecteurs des gains internes du rez-de-chaussée et injecté, pour chaque pièce, la température d'air mesurée comme consigne. En conséquence, les besoins résultant de cette paramétrisation devraient correspondre à la puissance injectée par les convecteurs électriques dans la réalité.

La consommation estimée par le modèle ainsi défini (4.7 kWh/m²/an) est du même ordre de grandeur que celle de la réalité (2.5 kWh/m²/an). Une comparaison en valeur relative n'a pas vraiment de sens à de si faibles niveaux de consommation, mais la surestimation du modèle va de pair avec la sous-estimation tendancielle des températures. On observe par ailleurs sur le *heat-map* ci-dessous que les dynamiques de ces puissances sont très similaires.

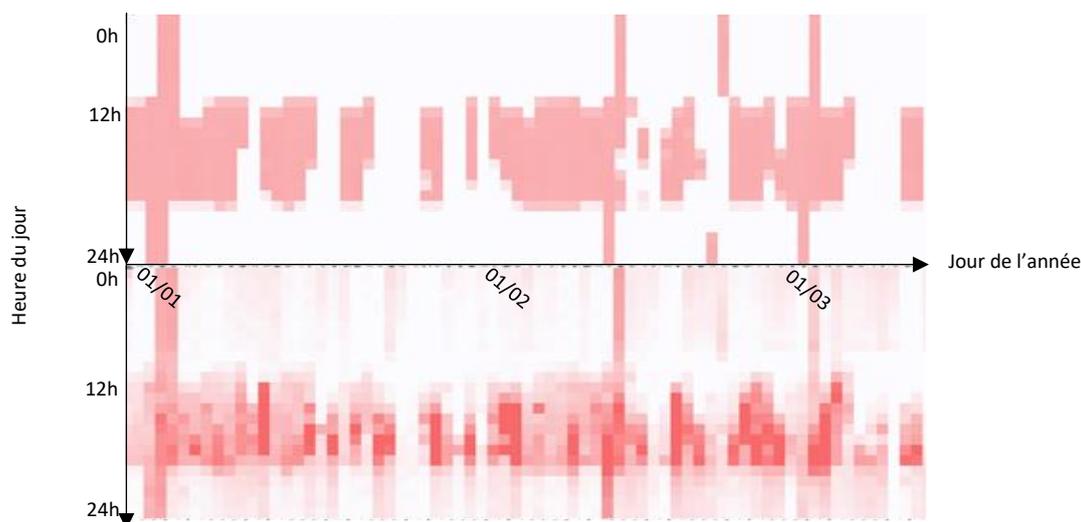


Figure 2.1.3.c – Heat-map de période journalière de la puissance délivrée par les convecteurs du 01/01 au 11/03.
En haut les mesures et en bas les résultats de simulation.

Enfin, on observe bien dans le tableau ci-dessous que la grande majorité de la puissance injectée l’est dans les communs du RdC (zone 5), conformément à la réalité. D’ailleurs, si on ne considère que la puissance délivrée dans cette zone, la consommation de chauffage est de 1.9 kWh/m²/an. Les écarts subsistants peuvent être imputés à une mauvaise prise en compte des gains internes (reconstitution, estimation, etc.) ou solaires, ainsi qu’aux autres approximations de modélisation. On remarque d’ailleurs que les deux zones sélectionnées pour la validation (zones 12 et 17) ont un besoin de chauffage nul ou quasi-nul, ce qui valide là encore leur modélisation.

Zone	Chauffage (kWh/an)	Chauffage (kWh/m ² /an)
Zone 1 : Communs RDJ et archives	0	0
Zone 2 : Grande Réunion	0	0
Zone 3 : Atelier	0	0
Zone 4 : Accueil	62	4
Zone 5 : Communs RDC	1 218	26
Zone 6 : Réfectoire	57	2
Zone 7 : Réunion	76	4
Zone 8 : Visio	33	3
Zone 9 : Bureau Sud RDC	33	1
Zone 10 : Open Space Sud Ouest RDC	133	4
Zone 11 : Bureau Nord Ouest RDC	74	3
Zone 12 : Bureau Nord RDC	0	0
Zone 13 : Communs R+1	0	0
Zone 14 : Salle serveur	0	0
Zone 15 : Repro	50	3
Zone 16 : Bureaux Inocc Sud R+1	683	9
Zone 17 : Bureau Sud R+1	37	2
Zone 18 : Open Space Sud R+1	241	6
Zone 19 : Open Space Nord R+1	244	11
Zone 20 : Bureau Nord R+1	0	0
Zone 21 : Combles	0	0

Figure 2.1.3.d – Consommation de chauffage estimée par la simulation

Le modèle estime donc aussi les consommations énergétiques de façon réaliste.

Améliorations possibles

Il serait bien évidemment envisageable d'améliorer encore la modélisation en ajustant et affinant les paramètres incertains les plus influents (notamment occultation et aération), potentiellement zone par zone, mais cela nécessiterait, pour bien faire, des méthodes numériques plus lourdes (voir 3.3) et cela n'apporterait pas fondamentalement beaucoup plus de précision au modèle.

En effet, retrouver la paramétrisation « idéale » du modèle n'apporterait pas grand-chose, car notre objectif est plutôt d'établir un modèle fiable apte à reproduire convenablement les influences des sollicitations extérieures et intérieures sur le comportement thermique du bâtiment en vue de sa généralisation, d'autant que pour une telle étude, des sollicitations internes génériques seront utilisées. De plus, étant donné les incertitudes actuelles concernant les données d'entrées, la paramétrisation idéale n'a pas de sens, car elle-même, au mieux, ne peut être déterminée que de façon statistique.

A la vue des résultats précédents, il nous semble en définitive que le modèle établi reproduit de façon réaliste le comportement thermique du LowCal, et plutôt de manière conservatrice et donc sécuritaire (surestimation de la consommation de chauffage et de l'inconfort), et qu'en l'état toute amélioration ne devrait pas modifier de façon notable les résultats.

2.1.4 Impacts du comportement hygro-thermique

Lors de la calibration, la question de la contribution du comportement hygro-thermique des refends en terre crue dans le bilan énergétique global s'est posée. Notamment : l'eau contenue dans la terre s'évapore-t-elle l'été, contribuant ainsi à rafraîchir l'ambiance, et inversement l'hiver ?

A l'échelle annuelle

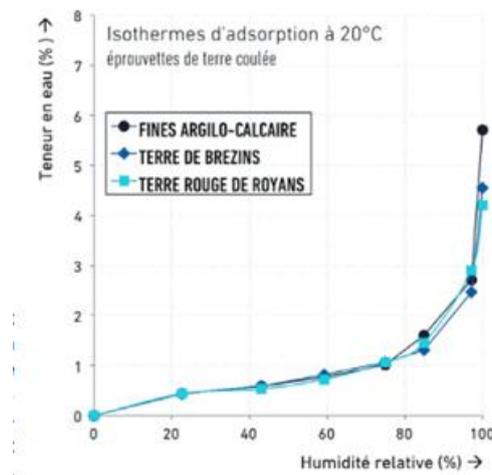


Figure 2.1.4.a – Exemple de courbes de sorption de terres crues⁷

Il s'avère que, contre-intuitivement, le phénomène est en réalité inversé. En effet la teneur en eau d'équilibre d'un matériau hygroscopique dépend de l'hygrométrie relative ambiante (voir courbe de sorption), à savoir intérieure dans notre cas ; et dans un bâtiment, l'hygrométrie relative est plus élevée l'été que l'hiver, ce qui conduit le matériau à absorber de l'eau l'été (le matériau s'humidifie ; l'eau

⁷ Source : Moevus-Dorvaux, Mariette et al. (2016). "Béton d'Argile Environnemental – Résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application". CRAterre éditions.

condense et réchauffe l’air ambiant) et à en relarguer l’hiver (le matériau sèche ; l’eau s’évapore et refroidit l’air ambiant).

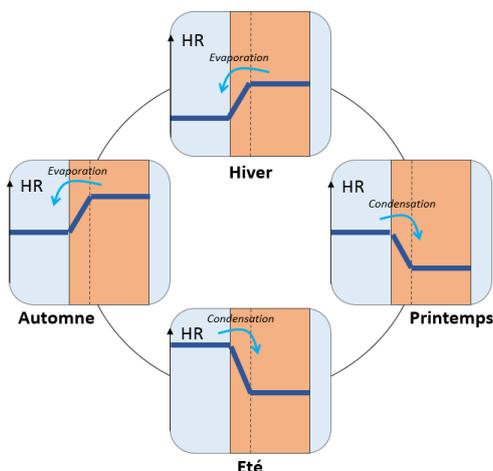


Figure 2.1.4.b – Evolution saisonnière de l’humidité ambiante intérieure et dans le matériau.

Ceci est dû au fait que l’air froid a une plus faible capacité hydrique (voir diagramme de l’air humide). En hiver, en entrant dans le bâtiment, cet air se réchauffe ce qui a pour conséquence de diminuer son hygrométrie relative. Inversement l’air entrant en été a plutôt tendance à se rafraichir et donc à augmenter son hygrométrie relative. Ces phénomènes conduisent à une hygrométrie relative plus importante l’été que l’hiver en intérieur. Comme l’indique la figure 2.1.4.d, cette évolution est confirmée par les mesures.

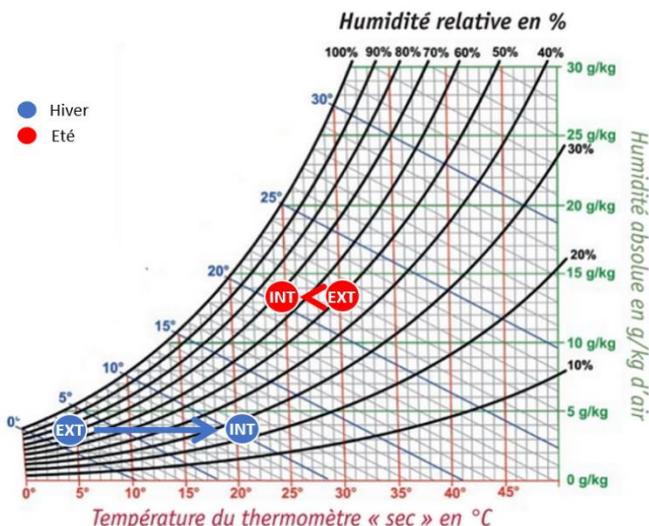


Figure 2.1.4.c – Comparaison schématique de l’hygrométrie extérieure et intérieure, en ne considérant que le renouvellement d’air, selon les saisons.

D’expérience, ce phénomène paraît contre-intuitif car on a tous expérimenté le fait qu’il est plus facile de faire sécher un matériau humide l’été que l’hiver. Ceci est d’une part dû au fait que cela se fait généralement à l’extérieur et qu’on a alors bien une hygrométrie relative plus importante l’hiver que l’été, et d’autre part que la capacité hydrique de l’air est plus faible quand il fait froid que quand il fait chaud, et donc que pour un même taux d’évaporation, et en partant d’une même humidité relative, l’air sature donc plus vite en hiver.

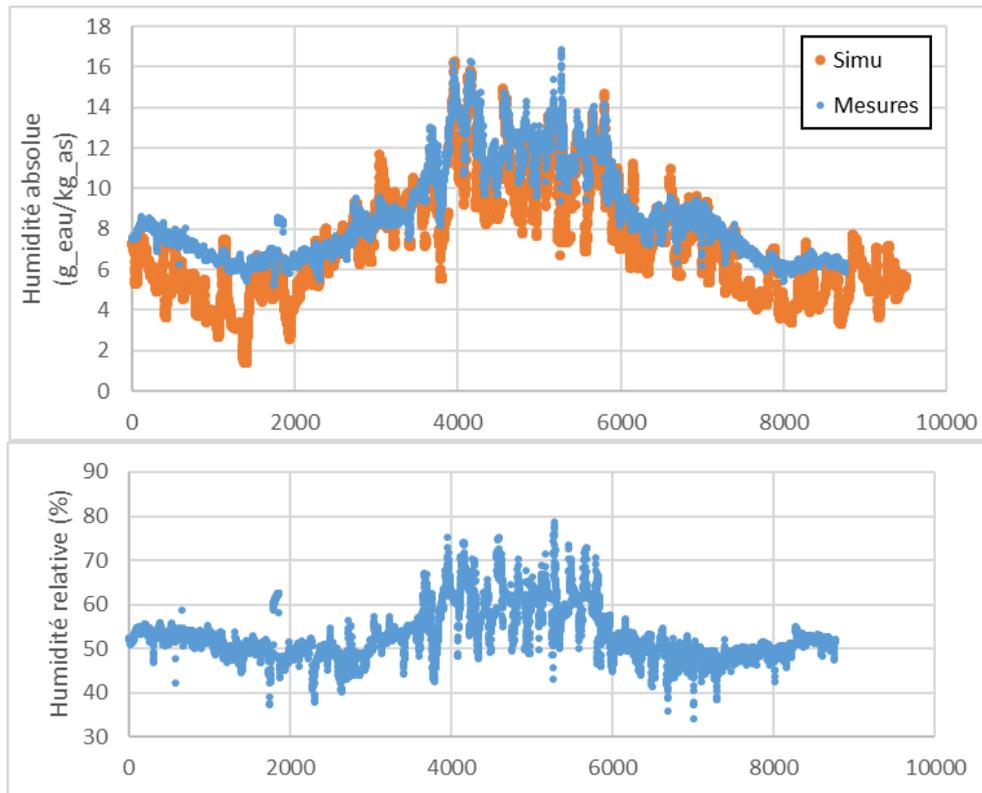


Figure 2.1.4.d – Evolution de l'humidité intérieure⁸ (zone 17) d'après les mesures et la simulation sans modélisation de phénomène hygroscopique.

Comme l'indique la courbe ci-dessus, le refend en terre crue, en complément du caractère enthalpique de la ventilation double-flux, contribue bien à la stabilisation de l'hygrométrie intérieure. Toutefois, les flux engendrés par ces phénomènes d'évaporation et de condensation sont tout à fait négligeables et ne viennent pas perturber sensiblement le comportement thermique global du bâtiment.

En effet, en humidité relative, la teneur en eau passe d'environ 50% en moyenne l'hiver à 60% l'été. D'après les courbes 2.1.4.a, cela correspond approximativement à une variation de 0,002 kg_{eau}/kg de terre crue, soit approximativement 70 kg d'eau. L'évaporation ou la condensation de cette eau nécessite une énergie de 44 kWh sur une année, qui ramenée à la surface utile du bâtiment donne moins de 0,1 kWh/m²/an (négligeable par rapport aux autres bilans énergétiques, voir 2.2.2).

A l'échelle journalière

A l'échelle d'une journée, les amplitudes quotidiennes l'hiver montent jusqu'à 5% alors qu'elles peuvent atteindre 20% l'été à cause de l'usage de l'aération naturelle, ce qui ne remet pas en cause le caractère négligeable des flux énergétiques, d'autant que l'épaisseur de pénétration de l'humidité sur une journée doit être inférieure à l'épaisseur des refends en terre crue. Supposons enfin un cas limite : en été la teneur en eau absolue moyenne est de 15 g_{eau}/kg_{d'air sec}. A ce niveau, l'air peut approximativement absorber environ 10 g_{eau}/kg_{d'air sec} avant d'être saturée, et en perdre quasiment autant pour être totalement sec. Supposons que le renouvellement d'air est d'environ 0,6 vol/h, soit 1140 kg_{d'air sec}/h. Le mur ne peut donc qu'absorber ou désorber au plus 11,4 kg d'eau (10 x 1140 / 1000) sur une heure, ce qui correspondrait à un flux énergétique de 7 kW sur une heure à l'échelle du bâtiment, soit une dizaine de Watt par mètre

⁸ La comparaison en humidité absolue permet de s'affranchir de l'influence des écarts de températures entre simulation et mesures

carré. Ce cas est purement hypothétique car extrême⁹, mais montre la limite théorique de la capacité hygro-thermique des parois d'un bâtiment.

Les mesures montrent (figure 2.1.4.e) que les dynamiques coïncident avec ce qui serait souhaitable (évaporation en milieu de journée, condensation la nuit). Mais les variations se font sur des périodes bien plus longues que le pas de temps horaire (et donc la puissance latente bien plus faible) et les flux sont globalement nuls à l'échelle d'une journée (augmentation de l'hygrométrie suivie d'une diminution du même ordre de grandeur).

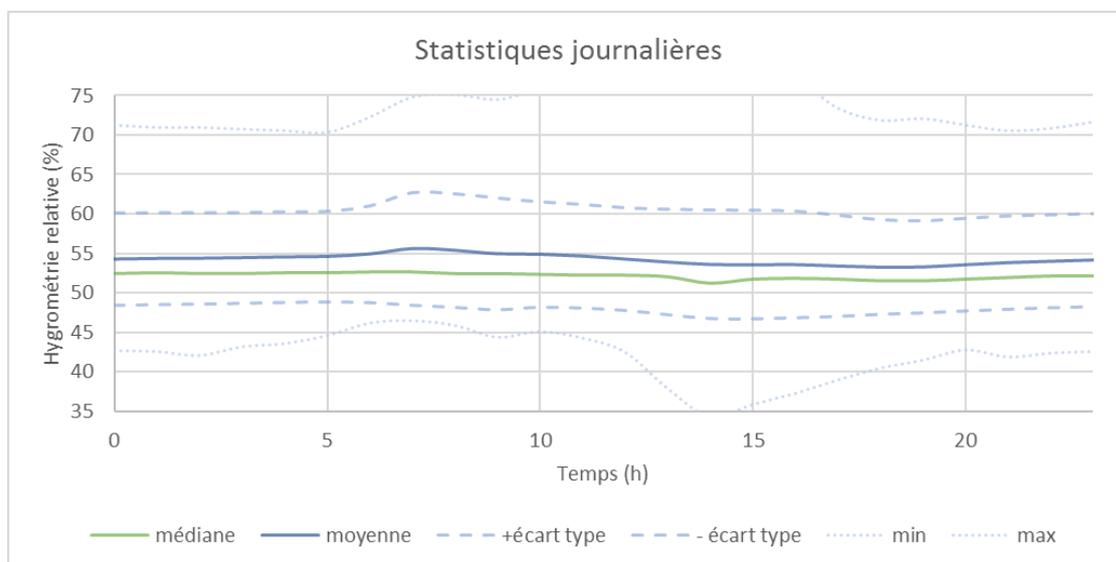


Figure 2.1.4.e – Statistiques journalières de l'évolution de l'humidité relative intérieure (zone 17) d'après les mesures sur la période estivale (du 20/06 au 20/09).

En définitive, les phénomènes hygro-thermiques ne semblent donc pas jouer un rôle majeur dans le comportement thermique du LowCal. Par ailleurs, s'agissant de refends, nous nous situons ici dans le cas de parois intérieures intégralement soumises à la condition ambiante intérieure. Ces conclusions ont été confirmées par des échanges informels avec d'autres partenaires ayant travaillé sur le sujet, y compris pour des parois extérieures pour lesquelles un flux hydrique est généré par la différence de pression interstitielle de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur. Quoiqu'il en soit, ce comportement hygroscopique reste relativement mal modélisé dans le détail de par sa complexité et son lien avec la température et mériterait une meilleure compréhension et une analyse plus poussée.

⁹ En réalité le potentiel est d'autant plus faible pour le LowCal à cause de l'échangeur enthalpique des double-flux.

2.2 Chiffre-clés

La STD, en offrant un accès à un large panel de grandeurs physiques, permet de caractériser finement le comportement thermique du bâtiment. L'objectif de cette partie est de profiter du modèle établi pour obtenir une connaissance plus détaillée du LowCal.

2.2.1 Caractéristique du bâti

Déperditions

La conception du LowCal repose notamment sur une isolation très poussée de l'enveloppe (voir rendu « Etude des contraintes techniques », 1.2 - Enveloppe) qui permet une réduction majeure des besoins en chaud ou en froid du bâtiment. La répartition des déperditions par type de parois est donnée dans la figure 2.2.1.a. Il est notable de remarquer que plus de la moitié des déperditions proviennent des menuiseries (ponts thermiques intégrés inclus), bien que celles-ci ne représentent que 15% des surfaces exposées à l'extérieur. Cette observation justifie nettement le recours au triple vitrage.

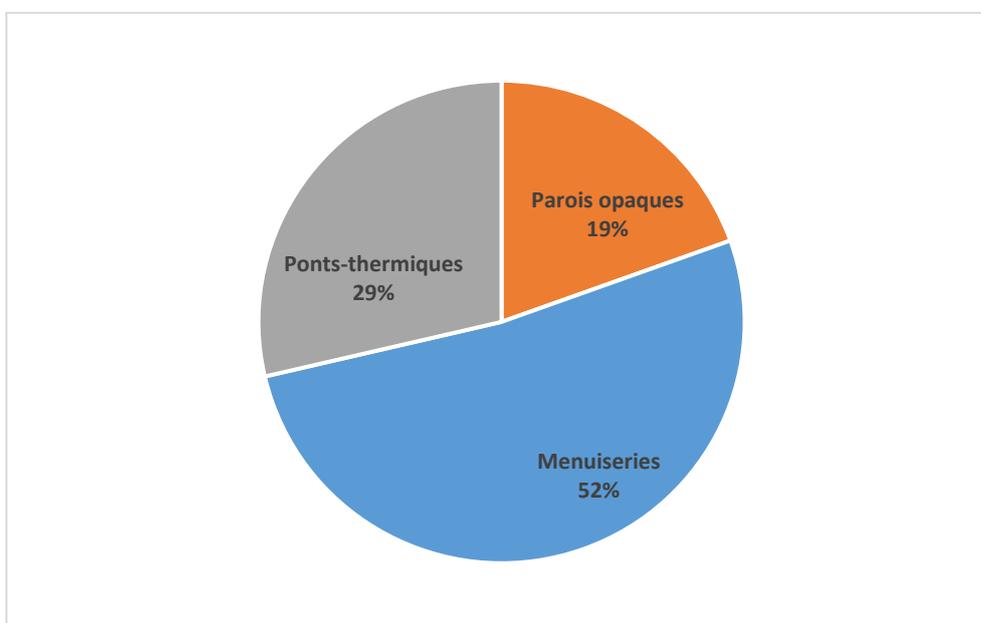


Figure 2.2.1.a – Répartition des déperditions des parois.

Les déperditions engendrées par les ponts thermiques et l'ensemble des parois opaques sont quasiment identiques. Là aussi, la minimisation des ponts thermiques grâce aux solutions techniques retenues et à la morphologie du bâtiment revêt toute son importance. Notons par ailleurs que la répartition de ces déperditions est calculée en statique et qu'en conditions réelles, dû au phénomène d'amortissement causé par l'inertie, celles-ci s'avèrent encore moindre. Dans le cas du LowCal et de son fonctionnement majoritairement passif (sans système fixe de chauffage), l'approche statique n'est pas adaptée, mais permet d'obtenir des ordres de grandeur quantifiant la qualité thermique de l'enveloppe.

Le renouvellement d'air n'a pas été inclus dans la figure précédente de sorte à se focaliser uniquement sur l'enveloppe et parce que la ventilation n'est pas constante, mais modulée pièce par pièce selon l'occupation. Toutefois, en supposant un fonctionnement simultané de toutes les unités décentralisées (0,3 vol/h au global pour le bâtiment), les déperditions engendrées en simple flux seraient du même ordre de grandeur que l'ensemble des déperditions engendrées par l'enveloppe (voir figure 2.2.1.b). L'utilisation de la technologie double-flux permet de diviser par près de 7 ces déperditions (rendement de l'échangeur de 85%). Ce choix technique, en complément de la modulation de la ventilation, révèle

donc tout leur intérêt dans le cas de bâtiment à très faible besoin. Rappelons que le n50 des infiltrations mesurées vaut 0,67 vol/h (ventilation non obturées), ce qui donne un débit moyen simulé de l'ordre de 0,03 vol/h, soit environ 50 m³/h d'air extérieur pénétrant dans le bâtiment entraînant des déperditions équivalentes à celle de la ventilation double-flux, d'où l'importance d'avoir une enveloppe étanche¹⁰.

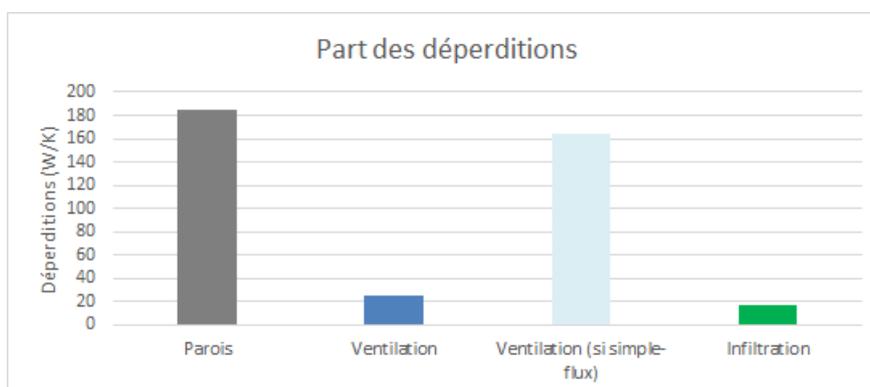


Figure 2.2.1.b – Part des différentes sources de déperditions (en bleu ciel valeur théorique si la ventilation était simple flux. Le projet est en double flux, c'est le barreau bleu qui représente la déperdition réelle)

Vitrages

Nous avons vu que les vitrages contribuaient majoritairement aux déperditions de l'enveloppe, mais leur intérêt ne réside évidemment pas en cela, mais dans leur capacité à transmettre à l'intérieur, en plus de la lumière naturelle, le flux solaire thermique. Ils contribuent ainsi directement au chauffage du bâtiment. Ces apports sont étudiés plus en détail au paragraphe 2.2.2, mais intéressons-nous ici au ratio *énergie solaire transmise sur déperditions*¹¹ à l'échelle du bâtiment. Cette comparaison nous permet aussi d'estimer le coefficient de déperdition U équivalent en retranchant les apports solaires aux déperditions.

	Saison de chauffage	Saison froide (sans occultations)
Ratio apports solaire/déperditions	90%	126%
U équivalent	0,1	-0,2

Figure 2.2.1.b – Comparaison des déperditions et des apports solaires des fenêtres.

On observe que lors de la saison la plus critique en termes de chauffage (lorsque celui-ci est utilisé ; première colonne de valeurs du tableau), le bilan thermique des fenêtres est quasiment neutre, ramenant fictivement le coefficient de déperdition des fenêtres de 0,9 à 0,1 W/m²/K, un niveau équivalent à celui des parois extérieures du LowCal. Sur la période froide globale (lorsqu'on ne cherche pas à se protéger du soleil, donc hors usage des occultations ; 2^{ème} colonne), les apports solaires dépassent même les déperditions des fenêtres de 26%. Les fenêtres jouant alors un rôle de « source de chaleur pure ».

Pour parvenir à de tels résultats, la valeur du facteur solaire (part du flux solaire incident transmis à l'intérieur) des menuiseries est essentielle. Le vitrage retenu possède un facteur solaire de 59%, ce qui est l'une des plus fortes valeurs pour les triples vitrages du marché. Selon leur dimension, le facteur solaire global des menuiseries varie entre 35 et 50%.

¹⁰ Sans attention particulière ces valeurs peuvent être facilement multipliées par 30...

¹¹ Les apports solaires sont issus des résultats de simulations tandis que les déperditions ont été estimées approximativement à partir de l'écart de température cumulé sur les différentes périodes entre température extérieure et température moyenne (mesurée) du bâtiment.

Le dimensionnement des vitrages a été étudié en détail en phase conception et a abouti à un taux de vitrage de 17% relativement à la surface utile et de 30% relativement aux façades. Ce dernier taux est d’environ 40% sur la façade Sud, de 30% sur les façades Est et Ouest et de 15% sur la façade Nord. Le bilan effectué précédemment pourrait être décliné spécifiquement pour chaque orientation, mais cela n’apporterait pas plus d’éléments (les fenêtres Sud auraient logiquement une meilleure performance, contrairement à celles du Nord) d’autant que ce qui nous intéresse ici, c’est le fonctionnement global du bâtiment.

Inertie

Considérations globales

L’inertie globale d’un bâtiment est d’autant plus grande que la surface interne des parois est grande (surface d’échange) et que l’inertie mobilisable par celles-ci l’est aussi.

La répartition des différentes surfaces internes dans le bâtiment montre que les cloisons fines sont les parois développant la plus grande surface d’échange. En cumulé, les planchers (dalles) présentent une surface d’échange semblable à celles des parois verticales (murs, refends, cloisons), respectivement 1 214 et 1 239 m².

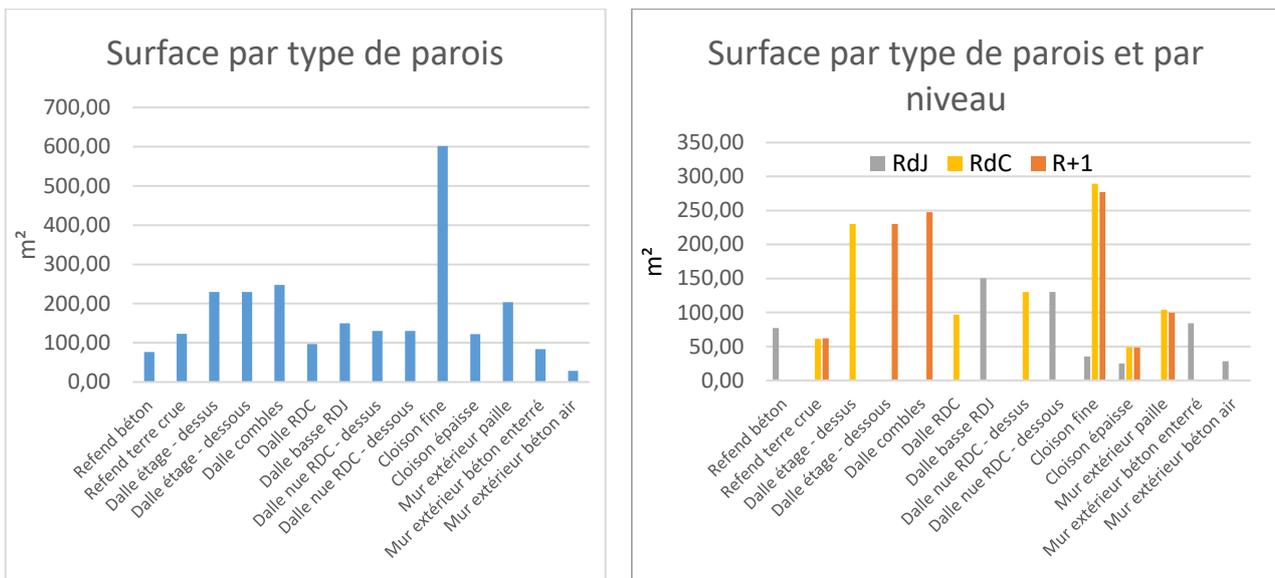


Figure 2.2.1.c – Répartition des surfaces exposées des parois selon leur type et le niveau du bâtiment.

Toutefois, ces deux types de parois n’ont pas la même inertie. L’inertie des différentes parois se calcule selon les propriétés thermiques des couches de matériaux les constituants (conductivité, capacité calorifique). Il convient de considérer en plus la période de sollicitation qui régit l’épaisseur de pénétration de l’onde de température et donc la quantité d’inertie réellement mobilisable¹². Les inerties journalière (période de 24h), séquentielle (12 jours) et annuelle (1 an) sont calculées conformément à la RT 2012.

¹² Se référer à la norme NF EN ISO 13786 pour plus de détail sur les calculs.



Figure 2.2.1.d – Répartition de l’inertie mobilisable par type de parois et par niveau du bâtiment.

On observe que les parois les plus inertielles sont les refends et les dalles. A l’opposé, les cloisons et la face interne des murs extérieurs (ayant un isolant en face interne) possèdent une inertie largement inférieure. Couplée à leur surface d’échange respective, les dalles contribuent majoritairement à l’inertie globale du bâtiment (79%) suivi ensuite par les refends (18%). En termes de matériaux, les parois en béton assurent 40% de l’inertie, contre 57% pour les parois contenant de la terre crue¹³.

On remarque enfin que les inerties journalière et séquentielle sont souvent quasiment identiques, ce qui indique que l’ensemble de la capacité inertielle des parois est sollicité par les sollicitations journalières et sert donc à atténuer les surchauffes quotidiennes engendrées par les flux solaires. Les parois offrant une inertie séquentielle en plus, et contribuant donc en plus à la stabilité des températures sur des périodes plus longues, sont : les dalles basses pour lesquelles l’inertie de la terre sous-jacente vient s’ajouter ; la

¹³ Avec la paramétrisation retenue, un mètre cube de terre crue apporte plus d’inertie qu’un mètre cube de béton (2 090 kg/m³ x 1 500 kJ/kg/K = 3 135 MJ/m³ /K contre 2 300 kg/m³ x 1 000 kJ/kg/K = 2 300 MJ/m³ /K). Pour rappel, la masse volumique a été mesurée et la capacité thermique est issue de tables. Etant donné la disparité des valeurs concernant la terre crue, cette conclusion n’est pas robuste, mais les ordres de grandeurs restent représentatifs.

dalle des combles, sollicitée uniquement sur sa face inférieure et qui nécessite des périodes plus importantes pour être sollicitées sur l'ensemble de leur épaisseur ; et les refends dont l'épaisseur est plus importante que l'épaisseur de pénétration quotidienne.

La décomposition par niveau est nécessaire car c'est l'inertie ramenée à la surface utile du niveau le plus défavorisé qui détermine la classe d'inertie d'un bâtiment au sens de la RT 2012. Le niveau le plus défavorisé s'avère être le rez-de-chaussée, tandis que le moins défavorisé est l'étage. En effet, celui-ci profite intégralement de l'inertie de la dalle haute remplie de terre crue, plus inertielle que les planchers bas en béton, contrairement aux autres planchers intermédiaires qui sont sollicités sur leurs deux faces.

Suivant l'annexe 1 de la règle Th-I de la RT 2012 portant sur la détermination de l'inertie quotidienne par le calcul, la capacité thermique quotidienne du niveau le plus défavorisé (le RdC) ramené à sa surface utile (C_m/A_{niv}) vaut 540 kJ/K/m². Pour déterminer la classe d'inertie associée, il faut le coupler à la surface d'échange équivalente des parois lourdes avec l'ambiance du niveau ramené à sa surface utile (A_m/A_{niv}) qui vaut 2,42. Conformément au tableau 1 de l'annexe citée précédemment, la classe d'inertie quotidienne correspondante est « Lourde ».

Pour les périodes plus longues (annexe 2 de la règle Th-I), la capacité thermique séquentielle du niveau le plus défavorisé (le RdC) ramené à sa surface utile (C_m/A_{niv}) valant 706 kJ/K/m², la classe associée est « Moyenne ».

Quotidienne	Séquentielle
Lourde	Moyenne

Figure 2.2.1.e – Classe d'inertie du local au sens de la RT 2012 (règle Th-I).

Notons que l'estimation des inerties mobilisables, conformément aux normes, a été faite à l'aide des méthodes simplifiées. Une approche plus détaillée et plus précise, en utilisant la méthode de calcul matricielle conduit à une inertie quotidienne « Légère », mais n'impacte pas notablement l'inertie séquentielle (impact des revêtements, notamment les parements en bois des planchers).

Etude détaillée de certaines compositions

Nous avons vu que l'inertie provenait majoritairement des dalles remplies de terre crue. L'analyse détaillée¹⁴ permet de montrer que sur une période de 24h, 22% de l'inertie totale de cette composition est utilisée (11% en partie haute et en partie basse) et que le déphasage engendré est de quasiment 1 h. L'épaisseur de pénétration de la terre crue est en effet de 9,8 cm pour une épaisseur de 10 cm dans la composition. Il faut atteindre des périodes de sollicitations d'environ 9 jours pour solliciter 90% de l'inertie totale. Si l'on enlève hypothétiquement les épaisseurs de bois inférieure et supérieure, on sollicite alors 44% de l'inertie totale. Autrement dit, les revêtements en bois coupent 50% du potentiel d'accès à l'inertie quotidienne. De plus, ces épaisseurs de bois retardent de 5 jours la période nécessaire pour solliciter 90% de l'inertie. Les parements permettent en quelque-sort de moduler la sollicitation de l'inertie en la déportant vers des constantes de temps plus longue.

Les refends en terre crue (2 fois 16 cm) jouaient un rôle non négligeable dans l'inertie globale du bâtiment. L'analyse détaillée permet de montrer que sur une période de 24h, 16% de l'inertie totale de cette composition est utilisée. Il est important de remarquer que lorsque le coefficient d'échange superficiel augmente, ce qui est le cas lorsqu'on aère fortement car la vitesse d'air augmente, on peut tendre vers une sollicitation de 47% de l'inertie total (dû à la réduction des résistances superficielles). Autrement dit,

¹⁴ A partir de la formulation matricielle.

pour une même période de sollicitation, l'aération permet de solliciter plus profondément l'inertie. S'il l'on considère toutefois la période plus faible de sollicitation on revient à des niveaux comparables. Par ailleurs, pour solliciter 95% de l'inertie il faut au moins une période de 13 jours. Ainsi, l'inertie des refends ne contribue quasiment pas plus annuellement que « séquentiellement ».

2.2.2 Bilans énergétiques

Hiver

En hiver, le LowCal est conçu pour valoriser les sources de chaleur disponibles passivement pour minimiser le recours à des sources externes. La contribution de ces différentes sources est étudiée ici en détail.

La consommation totale de chauffage mesurée sur l'année étudiée (2017-18) est de 2198 kWh, soit 3,5 kWh/m²/an. La puissance installée est de 4 kW, soit 6,4 W/m². La consommation de chauffage est équivalente à un fonctionnement à pleine puissance des convecteurs électriques pendant moins d'un mois (23 jours).

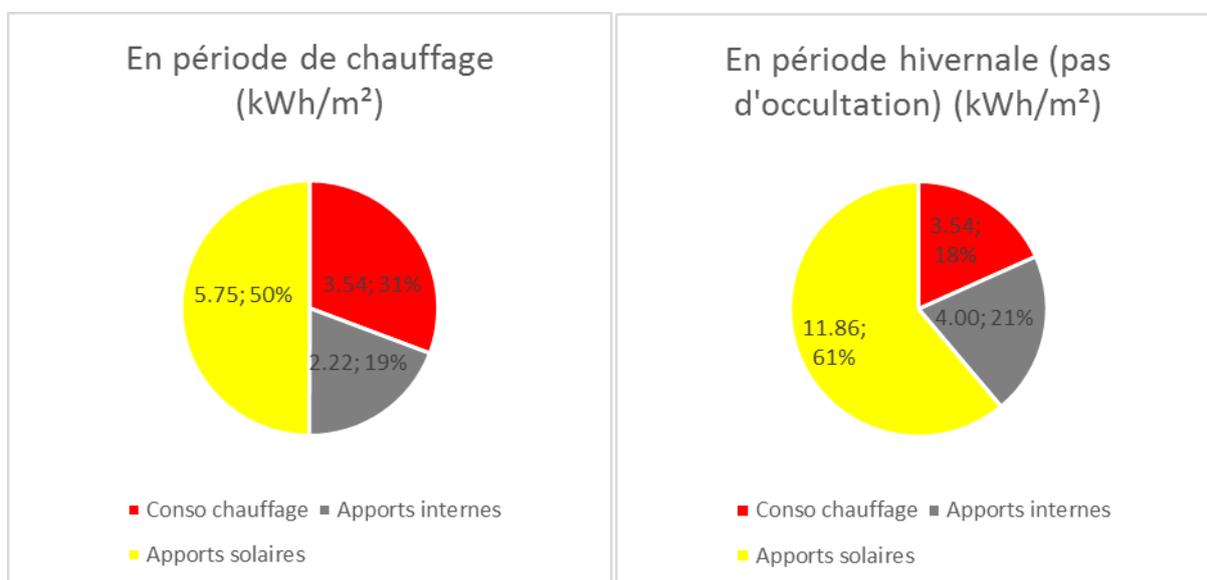


Figure 2.2.2 – Sources de chauffage du LowCal.

Sur la période de chauffage (lorsque le chauffage est utilisé), les apports internes totaux représentent 2,2 kWh/m² (d'après les mesures pour la part liées aux appareils électriques, et d'après des estimations pour les apports dus aux occupants) et les apports solaires 5,8 kWh/m² (estimé par le logiciel de STD à partir des mesures météo sur site). Autrement dit, sur la période de chauffage, donc la plus défavorable, le chauffage global du bâtiment est assuré à 50% par le soleil, 20% par les apports internes et seulement 30% par les convecteurs (voir figure 2.2.2).

Lorsque qu'on s'intéresse plus largement à l'ensemble de la période hivernale, donc aussi lorsque le chauffage n'est pas utilisé et qu'on ne cherche pas encore à se protéger du soleil pour éviter les surchauffes (« période hivernale » dans la figure 2.2.2), la part du « chauffage » solaire passe à 61% et celle des convecteurs à 18% (leur consommation est la même dans les deux figures, seule leur part relative change). Le LowCal est donc largement et majoritairement chauffé passivement par le soleil et de façon minoritaire par le systèmes de chauffage d'appoint.

Eté

Inversement, en été, le LowCal cherche à minimiser et à évacuer les apports de chaleur. Avec la STD, on estime¹⁵ que l'aération nocturne apporte un rafraîchissement de 16,6 kWh/m² en période chaude (lorsque les occultations sont utilisées). Ce qui compense les apports internes totaux (3,2 kWh/m²), dont la partie électrique fait l'objet d'une optimisation, et les apports solaires (9,2 kWh/m² ; part restante non occultée). Ces derniers apports représentant les principales sources de chaleur au cours de cette période¹⁶.

La contribution de la double-flux au rafraîchissement grâce à l'échangeur vaut 0,3 kWh/m². Cette faible contribution s'explique par la forte intermittence de l'utilisation de la ventilation mécanique et son ajustement à l'occupation pièce par pièce, ainsi qu'aux écarts de température entre intérieur et extérieur relativement faible en moyenne sur ces périodes.

2.2.3 « Techniques » de rafraîchissement

La gestion passive du LowCal en été est particulièrement « active » dans le sens où elle fait appel à l'utilisation de deux dispositifs : les occultations et l'ouverture des fenêtre pour l'aération.

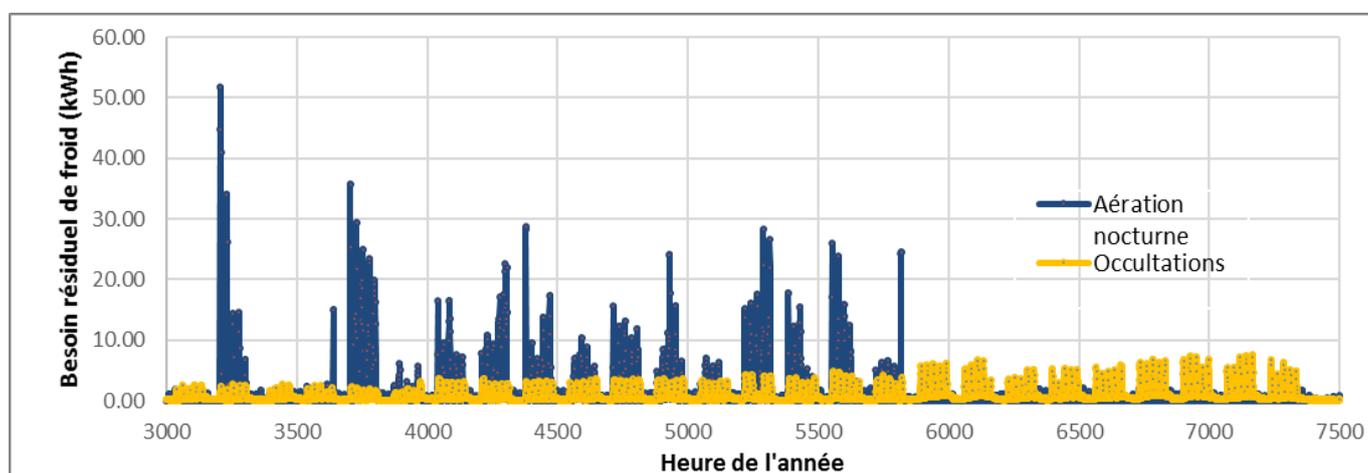


Figure 2.2.3.a – Evolution temporelle des besoins résiduels de froid.

Pour estimer leur contribution, nous avons imposé dans le modèle thermique les températures simulées en période chaude et calculé les besoins de froid résultant. Logiquement, ceux-ci sont quasi-nuls (les températures imposées étant celles de l'évolution libre, il n'y a pas besoin de climatisation). En supprimant l'une des stratégies, on obtient un besoin résiduel qui correspond donc au rafraîchissement apporté par celles-ci (figures 2.2.3.a et b).

« Techniques »	Rafrachissement
Aération nocturne ¹⁷	12,2 kWh/m ² /an
Occultations	7,1 kWh/m ²

Figure 2.2.3.b – Contributions au rafraîchissement

¹⁵ Estimé avec la STD en connaissant les débits de renouvellement d'air (simulés) et les écart de température entre intérieur (simulé) et extérieur (météo).

¹⁶ La chaleur transmise par les parois est inférieure à 1 kWh/m² (estimation réalisée de façon statique donc sans prendre en compte l'atténuation et l'amortissement dû à l'inertie de transmission).

¹⁷ Estimation cohérente avec la précédente suivant une autre méthode.

Ces apports sont loin d'être négligeables, ils représentent 10 fois la consommation de chauffage. Ces stratégies de rafraîchissement sont donc indispensables et jouent un rôle déterminant pour la gestion thermique du LowCal.

On observe par ailleurs que le taux d'occultation réel est, d'après les chiffres fournis dans cette section de 44 % ($7,1/(7,1+9,2)$), alors qu'il est paramétré à 90%. Cette différence s'explique par un usage intermittent des occultations. En effet, elles sont principalement utilisées pour se prémunir du flux direct (voir 4.5.3). Ceci permet de couper la plus grande partie du flux solaire, mais laisse entrer le flux diffus le reste du temps, qui peut atteindre en moyenne en journée fortement ensoleillée 200 W/m², ce qui en cumulé sur la journée n'est pas négligeable. De plus les scénarios utilisés ne sont pas définis finement : il arrive que du direct entre avant ou après que les occultations ne soient actionnées, laissant passer une partie du flux direct avant masquage ou après masquage. Ces deux éléments (flux indirect non masqué et non-occultation complète du direct) font que le taux d'occultation réel est plus faible que celui paramétré. Les apports solaires pourraient donc être réduits en période estivale en utilisant plus finement les occultations en fonction du flux direct, en les utilisant toute la journée pour masquer aussi le diffus et en occultant complètement les pièces inoccupées¹⁸. Ces actions auraient tendance de fait à améliorer le comportement du LowCal en période estivale (diminution des inconforts)

3 Contributions de la modélisation du LowCal

Au-delà de l'établissement d'un modèle fiable et robuste et la vérification de la pertinence des outils de modélisation, cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs enjeux pour la modélisation de bâtiments thermiquement performants existants, qui peuvent évidemment être étendus et ajoutés aux enjeux de modélisation en phase conception.

3.1 Enjeux de modélisation

Nous avons vu que l'incertitude qui pèse sur l'estimation des ponts-thermiques peut être très impactante pour ce type de bâtiment performant étant donné leur part non négligeable dans les pertes thermiques de l'enveloppe. A défaut de pouvoir être directement mesurés, ceux-ci sont nécessairement estimés et représentent donc un enjeu de modélisation. Cependant, les outils de STD présentent actuellement deux limitations concernant leur modélisation :

- l'absence de prise en compte de leur comportement dynamique ;
- et l'approximation de la température du sol.

Pour améliorer la fiabilité de ces outils, il serait souhaitable que des améliorations soient apportées à ces niveaux.

3.2 Enjeux pour les campagnes de mesures

Comme indiqué précédemment, les scénarios d'occultations et d'ouverture des fenêtres ont une forte influence sur le comportement énergétique du bâtiment, or ceux-ci sont fortement incertains car uniquement déterminés de façon théorique. Ainsi, pour une meilleure fiabilité du modèle il serait très intéressant de les déterminer plus précisément à l'aide d'instrumentations spécifiques.

¹⁸ A l'extrême, on pourrait occulter toutes les pièces et privilégier l'éclairage performant qui dissipe moins de chaleur que les apports solaires.

Quelques possibilités sont détaillées dans le tableau suivant par ordre de complexité croissante :

		Commentaires
Occultations	Mesure de la luminosité couplée à la température de surface	Un lampemètre permet de savoir si la pièce est éclairée naturellement (a minima diffus). L'utilisation d'une sonde de température placée dans la zone éclairée par la fenêtre permet de déterminer quand celle-ci est éclairée directement (mesure d'une élévation importante de la température).
	Contacteur au niveau de l'interrupteur	Uniquement connaissance de l'actionnement des BSO, mais pas de leur positions (ouvert, fermé, mi-chemin). Peut toutefois être déduit en fonction des saisons et des heures de mise en route.
	Mesure de la position des BSO (par télémétrie)	Permet de connaître la position exacte des BSO à tout instant. Mais instrumentation plus lourde et plus complexe.
	Prise de photo des façades extérieures à intervalle régulier (ou commandé lors de l'actionnement)	Permet de connaître la position exacte des BSO à tout instant. Mais instrumentation relativement lourde.
	Mesure de la différence de flux global entre intérieur et extérieur	Permet de connaître précisément le taux de réduction du flux transmis occasionné par les BSO. Mais instrumentation beaucoup plus lourde.
Aération	Feuillure sur chaque fenêtre	Permet de connaître l'état de la fenêtre à tout instant (ouverte ou fermée), mais pas le type d'ouverture (ouverture normale ou en soufflet).
	Utilisation de gaz traceur	Détermination du débit à partir de la concentration du gaz

Figure 3.2 – Inventaire des solutions de métrologie envisageables pour une meilleure connaissance des occultations et de l'aération.

3.3 *Besoin de méthodes de calibration adaptées*

A défaut d'outil existant adapté, la calibration est faite manuellement par le modélisateur. Les outils actuels ne sont pas encore adaptés car ils ne permettent pas :

1. de prendre en compte des sorties temporelles ou de définir de nouveaux indicateurs scalaires (autre que le besoin de chauffage annuel notamment) ;
2. de modifier de façon dynamique et automatique les scénarios (actuellement, il est uniquement possible de modifier des paramètres scalaires ou de faire varier des prédéfinitions) ;
3. de fournir plusieurs jeux de paramètres permettant de calibrer le modèle en considérant une plage d'incertitude pour les résultats.

Le premier point peut être contourné en injectant dans le modèle les températures mesurées. Le besoin de chauffage que calculera le modèle correspondra ainsi à un résidu qu'il faudra minimiser (devrait être nul en théorie), via une méthode d'optimisation (disponible dans de nombreux outils). La possibilité d'accéder aux meilleures solutions répondrait au passage au troisième point.

3.4 *Diffusion d'un cas d'études*

Le cas d'étude que représente le modèle du LowCal et son instrumentation quasi-exhaustive représente un cas rare pouvant permettre de calibrer un modèle numérique et de vérifier la validité d'un outil de modélisation, de façon similaire à la cellule BESTLab¹⁹ d'EdF R&D ou à la plateforme INCAS de l'INES²⁰, mais cette fois-ci sur un cas réel.

A titre d'exemple, ce modèle pourrait donc servir de cas d'études pour tester et comparer différents outils de modélisation/simulation, des méthodes de calibration et/ou des variantes de conception, et donc d'approfondir certains points, voire d'élargir le champ du présent sujet.

Conscient de l'intérêt que pourrait avoir ce cas d'étude auprès de la communauté des chercheurs et des modélisateurs, et dans sa logique de diffusion, Enertech se tiendrait prêt à mettre à disposition les informations utiles en sa possession (à des fins de recherche) permettant de modéliser au mieux le LowCal en conditions réelles et de développer des outils de calibration avancée tels que décrits précédemment.

¹⁹ Voir Bontemps, Stéphanie (2015) cité plus haut.

²⁰ Brun, Adrien (2009). "Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building". Eleventh International IBPSA Conference.

4 Annexe : rapport de modélisation du LowCal

Les informations fournies dans ce rapport correspondent au paramétrage final, après calibration du modèle.

4.1 Présentation du bâtiment

4.1.1 Description globale

Le bâtiment	
Nom	LowCal, siège d'Enertech
Localisation	Pont-de-Barret, Drôme
Maître d'ouvrage	SCOP Enertech
Surface utile	620 m ²
Nombre de niveaux	3 ; RDJ, RDC et R+1
Plan de situation (source Géoportail)	
Plan de masse (source Géoportail)	

Figure 3.5.1.a – Fiche récapitulative.

Le bâtiment étudié est situé sur la commune de Pont-de-Barret, dans le département de la Drôme, à une altitude de 240 m. Il se situe dans la zone climatique H2d au sens de la RT2012.

La façade principale de ce bâtiment est orientée plein Sud.

Il s'agit d'un bâtiment tertiaire de bureaux. En plus des bureaux, le bâtiment comporte un vestiaire et une salle d'eau, un réfectoire, des salles de réunion, un atelier, une salle serveur et une salle de reprographie (voir zonage).

Le bâtiment n'est pas équipé de système centralisé de production de chaud ou de froid. Seuls quatre convecteurs électriques à effet Joules d'une puissance totale de 4 kW sont installés et utilisés ponctuellement l'hiver pour l'ensemble du bâtiment.

Voir le rendu précédent « Etude des contraintes techniques » pour une description plus détaillée du bâtiment.



Figure 3.5.1.b – Vues intérieures et extérieures du LowCal.

4.1.2 Instrumentation

Ce bâtiment a été instrumenté par Enertech dans le cadre du présent projet. Les consommations des divers appareils électriques ont été mesurées sur une année de façon la plus exhaustive possible. En complément, les conditions hygro-thermiques des différentes pièces et extérieures ont aussi été mesurées (voir détails instrumentation dans rendu 1.2 et 2.1). Ces données de mesures ont permis de valider la modélisation numérique.

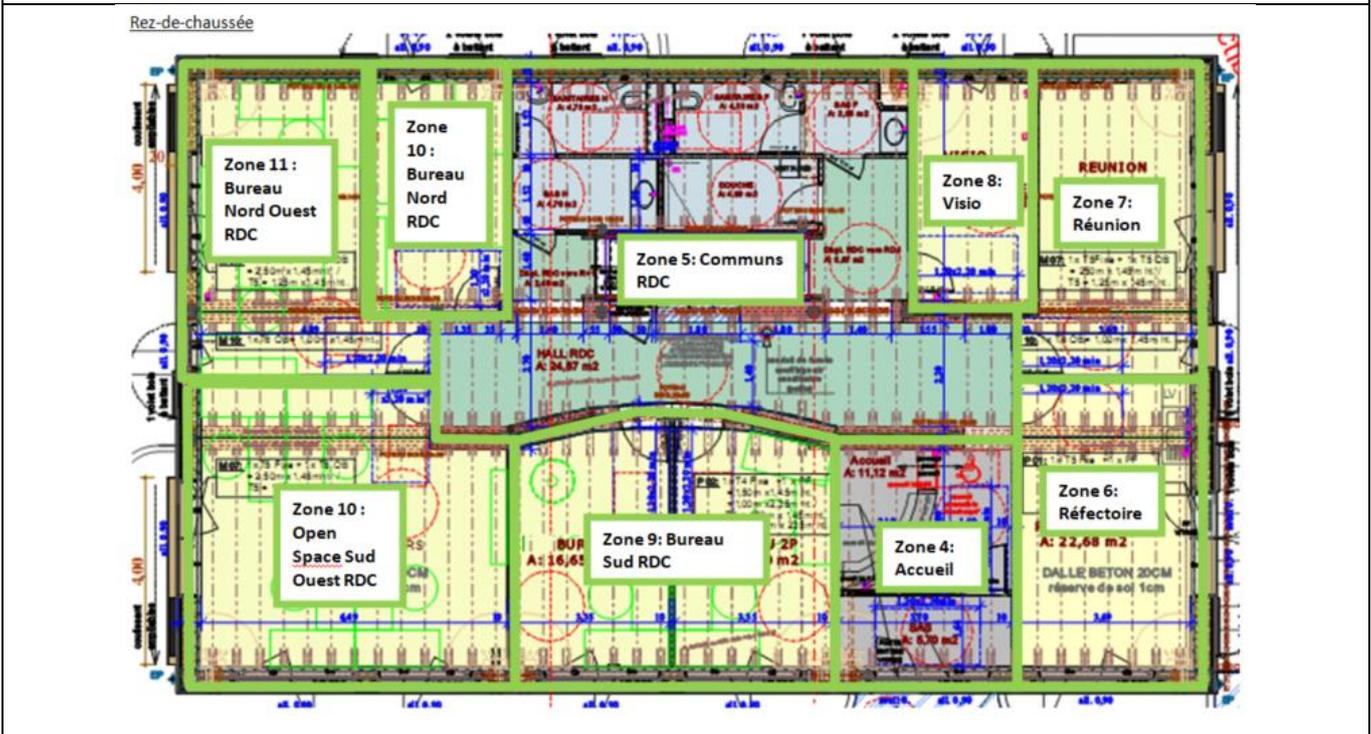
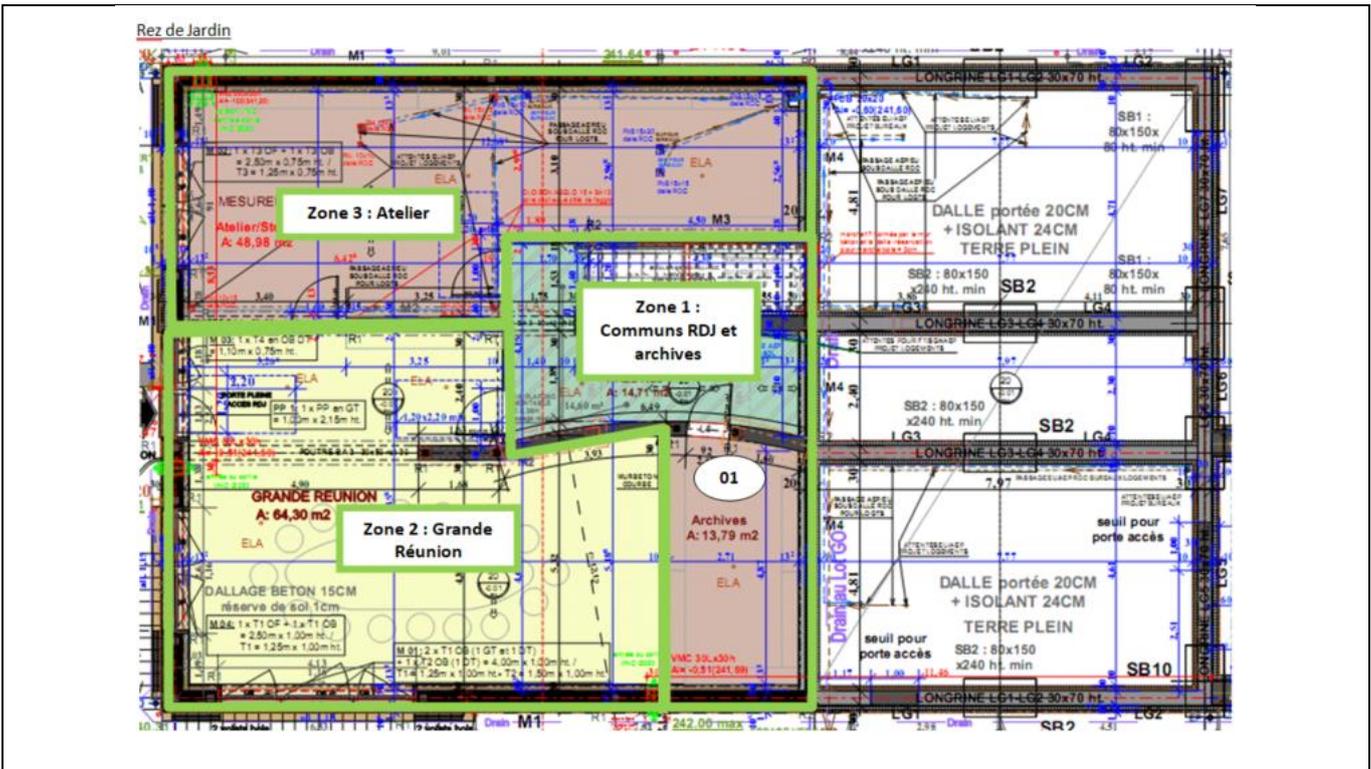
4.1.3 Outil de modélisation/simulation

La modélisation numérique et les simulations dynamiques ont été réalisées avec les outils TRNSYS et Pléaides. Conformément aux mesures disponibles lors de l'établissement du modèle, la période simulée s'étend du 21 mai 2017 au 20 mai 2018.

4.2 Zonage

Le modèle numérique du bâtiment a été divisé en 21 zones thermiques afin de pouvoir étudier finement le comportement de la plupart des bureaux. Leur répartition est illustrée dans les figures ci-dessous. Les

bureaux Est de l’étage (zone 16) ont été regroupés car ils étaient majoritairement inoccupés durant la période de mesures. La zone 21, non présente sur les plans, comprend l’ensemble des combles.



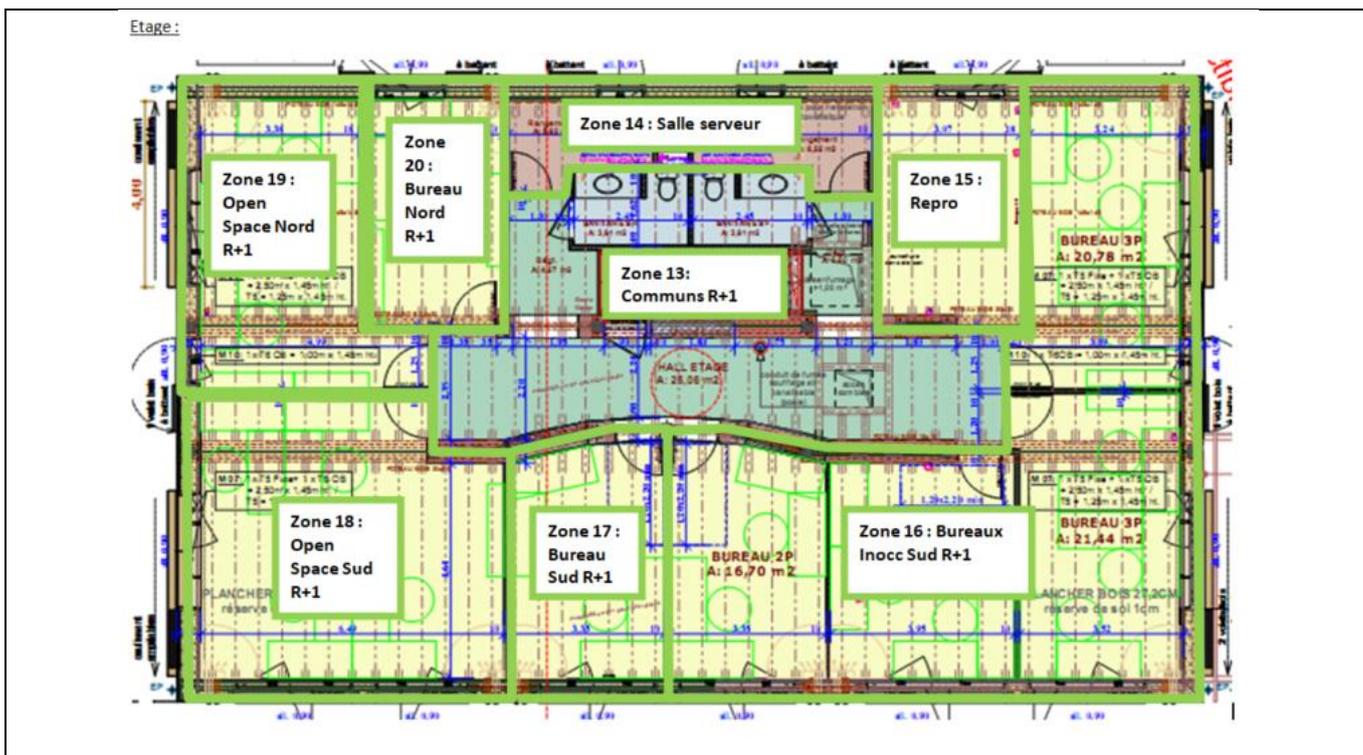


Figure 3.6 – Zonage du bâtiment.

4.3 Composition du bâtiment

4.3.1 Parois opaques

La composition des parois du bâtiment ainsi que les propriétés thermiques des différents éléments retenus sont données dans le tableau ci-dessous :

Parois	Composition (de l’intérieur vers extérieur)	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m/K)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité calorifique massique (J/kg/K)	Résistance thermique (m ² K/W)	U (incluant les ponts thermiques structurels) (W/m ² /K)
Mur extérieur béton	- Plaque de plâtre - Laine de bois - Béton - PSE	1,8 12,0 30,0 12,8	0,250 0,038 2,000 0,033	790 50 2300 35	792 2100 1000 1450	0,07 3,16 0,15 3,88	7,26 0,13
Mur extérieur paille	- Plaque de plâtre - Laine de bois - OSB - Caisson paille - Plaque fibre de bois	1,8 5,0 1,2 37,0 1,6	0,250 0,038 0,130 0,060 0,090	790 50 500 120 570	792 2100 2376 1300 2376	0,07 1,32 0,09 6,17 0,18	7,83 0,13
Mur extérieur Croix St-André	- Plaque de plâtre - Laine de bois - OSB - Laine de bois - Bois - Plaque fibre de bois	1,8 5 1,2 26,6 10,4 1,6	0,250 0,038 0,130 0,038 0,130 0,090	790 50 500 790 500 570	792 2100 2376 2100 1600 2376	0,07 1,32 0,09 7,00 0,80 0,18	9,46 0,10
Dalle basse RdJ	- Linoleum - Béton - PSE - Béton	1,0 15,0 24,0 5,0	0,170 2,000 0,038 2,000	1200 2300 35 2300	1400 1000 1450 1000	0,06 0,08 6,32 0,03	6,49 0,15

Dalle basse RdC	- Linoleum - Béton - PSE	1,0 20,0 24,0	0,170 2,000 0,038	1200 2300 35	1400 1000 1450	0,06 0,10 6,32	6,48	0,15
Dalle nue RdC	- Linoleum - Béton	1,0 20,0	0,170 2,000	1200 2300	1400 1000	0,06 0,10	0,16	2,00
Dalle étage	- Linoleum - OSB - Terre crue - Bois	1,0 2,2 10,0 2,7	0,170 0,130 1,100 0,130	1200 500 2090 500	1500 2376 1500 1600	0,06 0,17 0,09 0,21	0,53	1,15
Dalle haute combles	- Ouate de cellulose - OSB - Terre crue - Bois	40,0 2,2 15,0 2,7	0,040 0,130 1,100 0,130	45 500 2090 500	1900 2376 1500 1600	10 0,17 0,14 0,21	10,52	0,09
Refend béton	- Béton	30,0	2,000	2300	1000	0,15	0,15	2,44
Refend terre crue	- Terre crue - Lame d'air - Terre crue	16,0 20,0 16,0	1,100 1,180 1,100	2090 1 2090	1500 1000 1500	0,15 0,17 0,15	0,47	1,37
Cloison fine	- Plaque de plâtre - Laine de bois - Plaque de plâtre	1,8 6,0 1,8	0,250 0,038 0,250	790 50 790	792 2100 792	0,07 1,58 0,07	1,72	0,50
Cloison épaisse	- Plaque de plâtre - Laine de bois - Plaque de plâtre	1,8 18,0 1,8	0,250 0,038 0,250	790 50 790	792 2100 792	0,07 4,74 0,07	4,88	0,19

Figure 3.7.1 – Composition et caractéristiques thermique des parois.

4.3.2 Menuiseries

Les menuiseries utilisées comportent du triple vitrage dont le facteur solaire $g = 0,6$ et le $U_g = 0,59$ $W/m^2/K$. Le U_w moyen, varie selon la taille et le type de fenêtre (châssis fixe, nombre de vantaux, etc.), vaut $0,91$ $W/m^2/K$. De même, le facteur solaire des menuiseries varie entre $0,35$ et $0,51$. Le taux de vitrage est de 17% relativement à la surface utile et de 30% relativement à la surface de façades. Ce dernier taux est d'environ 40% sur la façade Sud, de 30% sur les façades Est et Ouest et de 15% sur la façade Nord.

4.3.3 Ponts thermiques

Le détail des différents ponts thermiques est donné dans le tableau ci-dessous :

Dénomination	Commentaires	Ψ (W/m/K)	Source
Dalle_basse_RdJ/Mur_Ext	Pont thermique de plancher entre la dalle basse du RdJ et les murs extérieurs en béton du RdJ	0,068	Calcul conducteö
Dalle_basse_RdJ/Mur_Enterré	Pont thermique de plancher entre la dalle basse du RdJ et les murs enterrés en béton du RdJ	0,039	Calcul conducteö
Dalle_basse_RdJ/Fondation	Pont thermique de plancher entre la dalle basse du RdJ et les fondations du RdJ non prolongées par un refend	0,400	Th-U
Dalle_basse_RdJ/Refend	Pont thermique de plancher entre la dalle basse du RdJ et les refends béton du RdJ	0,200	Th-U divisé par 2 (phase calibration)

Dalle_basse_RdC/Mur_Ext	Pont thermique de plancher entre la dalle basse du RdC, les longrines du vide sanitaire et les murs extérieurs en paille du RdC	0,200	Calcul conducteö divisé par 2 (phase calibration)
Dalle_basse_RdC/Vide_sanitaire	Pont thermique de plancher entre la dalle basse du RdC et le mur béton enterré Est	0,100	Th-U
Dalle_basse_RdC/Longrines	Pont thermique de plancher entre la dalle basse du RdC et les 2 longrines au centre du terre-plein	0,200	Th-U divisé par 2 (phase calibration)
Dalle_nue_RdC/Mur_Ext	Pont thermique de plancher entre la dalle nue du RdC, les murs extérieurs en béton du rez de jardin et les murs extérieurs en paille du RdC	0,200	Calcul conducteö divisé par 2 (phase calibration)
Dalle_R+1/Mur_Ext	Pont thermique de plancher entre la dalle de l'étage et les murs extérieurs en paille (RdC et R+1)	0,039	Calcul conducteö
Dalle_haute_Combles/Mur_Ext	Pont thermique de plancher entre la dalle des combles et les murs extérieurs	0,054	Calcul conducteö
Refend/Mur_béton_enterré	Pont thermique de refend entre les refends béton du RdJ et le mur béton enterré Est	0,110	Th-U
Refend/Longrines	Pont thermique de refend entre les refends béton du RdJ, le mur béton Est donnant sur le vide sanitaire et les longrines du vide sanitaire. Dans la continuité du pont thermique précédent.	0,100	Valeur forfaitaire
Refend/Mur_béton_ext	Pont thermique de refend entre le mur béton enterré Est du RdJ, les longrines et les murs bétons extérieurs du RdJ	0,150	Th-U
Angle_sortant_mur_béton_ext	Pont thermique d'angle entre les murs en béton du RdJ et l'extérieur	0,070	Th-U
Angle_sortant_mur_paille_ext	Pont thermique d'angle entre les murs en paille et l'extérieur (RdC et R+1)	0,070	Th-U
Angle_sortant_toiture	Négligé car donne sur les combles	-	-

Figure 3.7.3 – Détails des ponts thermiques modélisés ; valeurs et sources.

4.4 Sollicitations

4.4.1 Données météorologiques

Pour valider le modèle, il est nécessaire d'utiliser des données météorologiques réelles mesurées lors de l'instrumentation à proximité du bâtiment étudié. Celles-ci (la température extérieure, l'hygrométrie extérieure, la vitesse et la direction du vent ainsi que le rayonnement solaire global horizontal) ont pu être obtenues à partir d'une station météo installée sur le bâtiment dans le cadre de l'instrumentation complète.

La répartition des flux solaires entre direct et diffus est effectuée par un module spécifique à partir de l'ensemble des données météorologiques.

4.4.2 Masques solaires

Des masques solaires proches ont été définis pour les menuiseries. Ils correspondent aux débords de toiture et à la position en tunnel des menuiseries (joints et casquettes).

Aucun masque solaire lointain n'impacte notablement le bâtiment.

4.4.3 Apports internes

Liés aux appareils électriques

Les apports internes réels liés aux appareils électriques ont été mesurés et enregistrés dans le cadre de la campagne de mesure (voir plaquette LowCal dans la sous-tâche 1.1).

En particulier les mesureurs nous permettent de connaître les apports internes suivants :

- consommations liées à l'éclairage : durée de fonctionnement sur une heure fournie par les lampemètres et multipliée par la puissance installée dans chaque zone ;
- consommations liées à la ventilation double flux décentralisée : agrégation des mesures d'alimentation électrique à l'heure ;
- consommations des équipements de bureautique (ordinateurs portables et écrans) : agrégation des mesures d'alimentation électrique à l'heure ;
- consommations des équipements particuliers comme les imprimantes, les serveurs, le réseau téléphonique : agrégation des mesures d'alimentation électrique à l'heure ;
- apports internes liés à la production photovoltaïque : agrégation des mesures en entrée de l'onduleur à l'heure et multiplication par le coefficient de pertes de l'onduleur ;
- apports internes liés au chauffage d'appoint : agrégation des mesures d'alimentation des radiateurs à l'heure.

Liés aux occupants

L'occupation des bureaux est définie en fonction de l'alimentation des ordinateurs portables de chaque poste de travail agrégée à l'heure. Cette occupation est ensuite multipliée par les apports sensibles moyens. L'hiver, pour les apports sensibles liés aux occupants, est considéré de novembre à avril et l'été de mai à octobre.

	Hiver [W/pers.]	Eté [W/pers.]
Homme	94	61
Femme	75	50

Figure 3.8.3 – Apports sensibles dissipés par les occupants²¹.

4.5 Régime de fonctionnement

4.5.1 Renouvellement d'air

Infiltration d'air

Pour les infiltrations, le coefficient n50 a été paramétré à 0,6 vol/h conformément aux tests d'infiltrométries. Celui-ci est traduit par un renouvellement d'air annuel moyen de 0,03 vol/h variable à chaque heure en fonction de la vitesse du vent et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Ventilation mécanique

Les profils de ventilation sont les profils réels sur 2017/2018. Ils sont tirés de la mesure de l'alimentation électrique de chaque centrale de traitement d'air. Chaque bureau a son profil spécifique selon la mise en route et l'arrêt manuel de la part de l'utilisateur. Les centrales de traitement d'air des zones 8, 10, 15 et 20 fonctionnent toute la journée car elles sont couplées à l'extraction d'air des sanitaires. Leur mise en

²¹ Source : ROULET C-A, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, collection gérer l'environnement, presses polytechniques et université romandes, 2004, 358 p.

route et leur extinction coïncident avec l'arrivée du premier occupant le matin et le départ du dernier le soir.

Les débits d'air des unités de ventilation sont configurés selon les positions sélectionnées (de 1 à 4) sur chaque centrale. Ces débits sont réglés par l'utilisateur. Ils ont été supposés constants sur toute l'année 2017/2018. Ils varient de 27 à 94 m³/h selon la zone. L'efficacité de l'échangeur de chaleur des unités de ventilation est de 85%.

Ventilation naturelle

Ces profils de ventilation sont des profils moyens estimés, l'ouverture des fenêtres n'étant pas instrumentée.

L'aération estivale diurne en ouverture totale des fenêtres est appliquée le matin de 8h à 9h du 4 juin au 2 septembre sur toutes les fenêtres. Dans le cas où le module de calcul aéraulique n'est pas utilisé, le renouvellement d'air occasionné est estimé à 10 vol/h.

L'aération estivale nocturne en position oscillante des menuiseries est appliquée de 19h à 8h du 15 juin au 14 septembre sur toutes les fenêtres de l'étage et de la zone 10 (Open Space du RdC) sauf le weekend (dès le vendredi soir). Le renouvellement d'air estimé est de 6 vol/h car les brise soleil orientables sont alors baissés et font barrage au renouvellement d'air.

L'aération diurne en mi-saison est appliquée en semaine de 13h à 16h du 14 mai au 1^{er} juin. Le renouvellement d'air estimé est de 5 vol/h car il se peut que les fenêtres soient tantôt en battant tantôt en oscillant selon le choix de l'occupant.

4.5.2 Chauffage

Dans la modélisation, la puissance dégagée par les convecteurs électriques est incluse dans les apports internes.

4.5.3 Occultations solaires

Les occultations solaires paramétrées sont les occultations extérieures. L'ouverture et la fermeture des occultations n'étant pas instrumentée, des profils de fonctionnement généraux ont été simulés.

Les occultations selon les différentes orientations et saisons sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Orientation des baies vitrées	Taux d'occultation des baies vitrées			
	Jours ouvrés			Week-ends et jours fériés
	Du 01/01 au 29/04 et du 05/11 au 31/12	Du 30/04 au 10/06 et du 17/09 au 29/10	Du 15/06 au 16/09	
Nord	De 19h à 8h : 100%	De 19h à 8h : 100%	De 19h à 8h : 100%	100%
Est	De 19h à 8h : 100%	De 10h à 13h : 50% De 19h à 8h : 100%	De 10h à 13h : 90% De 19h à 8h : 100%	100%
Sud	De 19h à 8h : 100%	De 10h à 17h : 70% De 19h à 8h : 100%	De 10h à 17h : 90% De 19h à 8h : 100%	100%
Ouest	De 19h à 8h : 100%	De 15h à 19h : 50% De 19h à 8h : 100%	De 15h à 19h : 90% De 19h à 8h : 100%	100%

Figure 3.9.3 – Scénarios d'occultations.