

**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 5** : high-experience

**Sous-tâche 5.2** : Etude thermique de généralisation du concept a tous les climats de France pour un usage tertiaire et résidentiel

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](mailto:romuald.caumont@ademe.fr)

01 47 65 21 49

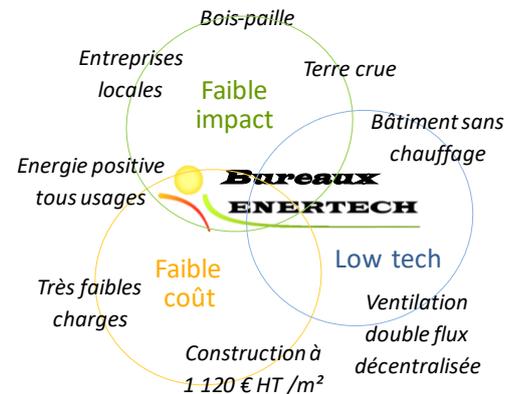
Version	Rédigé par	Relu par	Date
1	FB, LF	ChP, TR	07/08/2020

<b>OBJET</b> .....	<b>3</b>
<b>1 CAS D'ETUDES</b> .....	<b>3</b>
1.1 VARIANTE GÉNÉRIQUE DU LOWCAL .....	3
1.1.1 <i>Modification de la composition des parois - ajout d'un faux-plafond</i> .....	3
1.1.2 <i>Scénarios</i> .....	4
1.2 DÉFINITION DE L'ÉQUIVALENT RESIDENTIEL.....	7
1.2.1 <i>Agencement intérieur et zonage</i> .....	7
1.2.2 <i>Ventilation</i> .....	8
1.2.3 <i>Modification de la composition – cloisons mitoyennes</i> .....	8
1.2.4 <i>Modèle d'occupation</i> .....	9
<b>2 ETUDES</b> .....	<b>9</b>
2.1 COMPARAISON TERTIAIRE-RESIDENTIEL.....	9
2.1.1 <i>Besoins de chauffage</i> .....	9
2.1.2 <i>Inconfort d'été</i> .....	10
2.2 CHANGEMENT DE CLIMAT POUR L'USAGE DE BUREAUX .....	10
2.2.1 <i>Climats sélectionnés</i> .....	10
2.2.2 <i>Caractérisation des climats</i> .....	10
2.2.3 <i>Résultats et généralisation</i> .....	13
2.3 ZOOM SUR LES PÉRIODES CRITIQUES.....	17
2.3.1 <i>Période caniculaire</i> .....	17
2.3.2 <i>Période froide sans ensoleillement</i> .....	21
<b>3 OPTIMISATIONS</b> .....	<b>23</b>
3.1 PRINCIPE .....	23
3.2 METHODOLOGIE .....	23
3.3 RESULTATS .....	24
<b>CONCLUSION DE L'ÉTUDE</b> .....	<b>25</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>26</b>
PROFIL D'UTILISATION DE L'ÉCLAIRAGE POUR LE LOWCAL .....	26
PROFIL DU TAUX D'OCCUPATION POUR LE LOWCAL .....	27
OCCUPATION DES ZONES POUR LE LOWCAL .....	28
PLANS DU LOWCAL-RESIDENTIEL .....	29
ESTIMATIONS LORS DES PÉRIODES CRITIQUES.....	30
RESULTATS D'OPTIMISATION .....	31

## Objet

Les précédents volets de l'étude ont montré l'intérêt du bâtiment LowCal. Cependant, sa vocation de bâtiment « fer de lance » ne s'arrête pas à un seul bâtiment, nous souhaitons reproduire le concept pour d'autres maîtres d'ouvrages, dans d'autres lieux et pour d'autres usages.

Le « concept » LowCal, que nous associons à un ensemble d'objectifs résumé par le graphique ci-contre, a besoin d'être précisé : en particulier le caractère « sans chauffage fixe » est-il reproductible ?



L'objectif de cette sous-tâche est donc de tester la transposabilité du LowCal pour l'usage résidentiel d'une part et sous d'autres climats d'autre part. Le cas échéant, nous mettrons en évidence les variables de conception qui pourraient être optimisées.

## 1 Cas d'études

Cette étude a été menée sur différents cas d'études, à savoir : un cas générique du LowCal existant et une variante résidentielle, pour contraster avec son usage tertiaire.

### 1.1 Variante générique du LowCal

Une variante générique du LowCal est définie pour le rendre plus représentatif en vue de sa généralisation, notamment en termes d'usages car les occupants actuels sont très impliqués et des efforts importants ont été fait pour maîtriser les consommations électriques.

#### 1.1.1 Modification de la composition des parois - ajout d'un faux-plafond

Le modèle utilisé correspond au modèle établi et validé présenté en sous-tâche 1.3. Toutefois, en vue de sa généralisation, celui-ci a été légèrement modifié de sorte à incorporer un faux-plafond au RdC (plaque de plâtre avec 12cm d'isolant, afin de se prémunir des bruits de transmission aérienne et respecter ainsi les normes acoustiques afférentes en cas d'usage résidentiel). Cette modification a un impact mineur sur la hauteur du niveau<sup>1</sup> (augmentée en conséquence) mais un impact notable sur l'inertie du niveau comme le montre la figure 1.1.1<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Augmente de façon négligeable (0,8%) les déperditions par conduction (surface des façades plus importantes).

<sup>2</sup> Calculs réalisés avec les méthodes simplifiées de la Th-I.

Inertie	Journalière	Séquentielle	Annuelle
Total	-6.9 %	0.1 %	0.1 %
RdJ	0.0 %	0.0 %	0.0 %
RdC	-27.3 %	-19.5 %	-19.5 %
R+1	7.1 %	14.8 %	14.8 %
Dalle étage, face inf.	-94.0 %	-94.0 %	-94.0 %
Dalle étage, face sup.	33.5 %	92.7 %	92.7 %

Figure 1.1.1. Variations de l'inertie mobilisable due à l'ajout du faux-plafond au RdC.

On observe en effet qu'au RdC l'accès à l'inertie est quasiment bloquée par l'isolation du faux-plafond (face inférieure de la dalle étage), de façon plus préjudiciable pour l'inertie journalière, mais que cette inertie est « récupérée » par l'étage (face supérieure de la dalle étage), quasiment intégralement pour des périodes suffisamment longue (plusieurs journées). Cette diminution notable de l'inertie journalière fait que la classe d'inertie quotidienne au sens de la RT 2012, calculée pour le niveau le plus défavorable, passe de lourde à légère.

En termes d'impact sur les températures, cela se traduit par une augmentation maximale de 1,5°C en moyenne pour le RdC, alors que le R+1 a tendance à être légèrement plus frais. Mais en contrepartie, ce niveau se refroidit plus lors des aérations nocturnes.

Cette correction acoustique est donc préjudiciable pour le comportement thermique du LowCal. D'autres principes constructifs capables de corriger ce défaut acoustique sans impacter l'inertie mériteraient d'être étudiées en vue de la généralisation du LowCal mais ne font pas l'objet du présent rendu (voir également le livrable de la sous-tâche 5.1 sur la question croisée de l'acoustique et de l'inertie mobilisable).

## 1.1.2 Scénarios

### Température de consigne

Le comportement réel du LowCal, fortement passif et avec chauffages régulés sur la température de la masse uniquement dans le hall du RdC, ne serait pas forcément accepté par tous les usagers. De sorte à être plus représentatif, nous supposons pour la variante générique que la température est maintenue dans chaque bureau à 20°C lors des périodes d'occupation globale du bâtiment et à 18°C la nuit hors week-end.

### Apports internes

Pour la variante générique, les scénarios d'occupation et d'utilisation du bâtiment ont été modifiés. Ces scénarios, dits génériques, considèrent le lowCal dans son occupation nominale, à savoir 35 personnes, et avec des apports internes optimisés mais avec une utilisation plus classique que ce qui a été mesurés au LowCal.

### Eclairage

Dans les bureaux du LowCal l'éclairage installé dispose d'une puissance d'environ 2,5 W/m<sup>2</sup>. Le profil de fonctionnement générique de l'éclairage est défini à partir de valeurs moyennes de profils de charge<sup>3</sup> issues d'une enquête terrain Enertech dans 50 bâtiments de bureaux en PACA. Il varie selon le type de bureau (individuel ou paysager). Les profils sont donnés en annexe. Nous considérons les zones 10, 18 et 19 comme des bureaux paysagers et les autres bureaux comme des bureaux individuels (zones 4, 9, 11, 12, 16, 17, 20). Il reste toujours une consommation résiduelle même la nuit qui correspond à la consommation des blocs autonomes d'éclairage de sécurité. Pour les autres zones, communs, réunions, visio et réfectoire nous négligeons les apports internes liés à l'éclairage.

### Occupation

En ce qui concerne les apports internes liés à l'occupation nous considérons les apports sensibles suivants<sup>4</sup> :

	Hiver (W/pers.)	Été (W/pers.)	%tage effectif total
Homme	94	61	50%
Femme	75	50	50%

Le profil du taux d'occupation est donné en annexe. En juillet aout, les effectifs sont considérés présents à 100%. On choisit en effet de ne pas prendre en compte de congés particuliers afin d'étudier les cas les plus défavorables de surchauffe estivale. La répartition du nombre de personnes par zone est donnée en annexe.

### Informatique

On considère la puissance d'un ordinateur portable égale à 25W et d'un écran à égale 25W, ce qui constitue un poste informatique. On compte 1 poste informatique par personne dans les bureaux, en fonctionnement pendant la période d'occupation.

Pour les serveurs et tous les équipements liés au réseau informatique et à la téléphonie, la puissance considérée est de 160 W (donnée du LowCal). Cette puissance est multipliée par deux pour prendre en compte de façon grossière la puissance dissipée par l'onduleur lié aux panneaux PV.

On considère une imprimante multifonctions dans la salle repro (zone 15) ainsi qu'une imprimante classique dans la zone 9 (Bureaux Sud RDC) et à l'accueil (zone 4), leur puissance et profil de fonctionnement sont déterminés selon une enquête terrain Enertech dans 50 bâtiments de bureaux en PACA.

On considère une coupure des veilles de ces équipements la nuit.

<sup>3</sup> On néglige donc l'interaction entre usage de l'éclairage et luminosité.

<sup>4</sup> 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.

### Ventilation

Les taux d'utilisation des ventilations double-flux décentralisées par rapport à leur régime nominal sont directement modulés par le taux d'occupation des différentes pièces.

### Occultations et aération

Contrairement aux autres scénarios, les scénarios d'occultation et d'aération ne peuvent pas être prédéfinis a priori parce qu'ils dépendent des conditions internes du bâtiment. Ceux-ci sont d'autant moins pré-définissables que différents climats vont être étudiés.

L'aération matinale et d'inter-saison pourrait être définie en fonction des conditions intérieures et extérieures, mais il est nécessaire de limiter celle-ci aux périodes d'occupation. L'aération nocturne a lieu toute la nuit mais seulement en période chaude. Les conditions ne peuvent pas être scénarisées et sous condition avec Pléiades. Pour s'affranchir de cette limitation, la méthode itérative suivante a été définie et utilisée :

0. On considère une température de consigne minimale (besoin de chaleur) et maximale (besoin de rafraîchissement) uniquement sur les heures d'occupation.
1. Simulation sans occultation et sans aération.  
La période de besoin de froid obtenue (semaines consécutives) est définie comme période d'usage des occultations pour l'étape 2. La durée de la consigne minimale est réduite aux périodes de besoin de chaleur.
2. Simulation avec occultations et sans aération.  
La période de besoin de froid obtenue est définie comme période d'usage de l'aération nocturne pour l'étape 3. La consigne maximale est supprimée.
3. Simulation avec occultations et aération corrigée utilisée pour les études.

A l'issue de ces étapes, il est possible que soit apparues des épisodes de besoins de froid lors des périodes où les occultations et/ou l'aération nocturne sont utilisées. Celles-ci sont dues à un usage trop important des occultations privant le bâtiment de son chauffage passif avec les apports solaires, ou d'un refroidissement trop important en période nocturne. En conséquence les niveaux d'occultation et d'ouverture des fenêtres devraient être ajustés de sorte à occulter et aérer juste le nécessaire. Cependant, ces étapes étant lourdes et chronophages, et étant donné le nombre de simulation à tester, dans la suite, nous nous sommes restreints aux seules 3 étapes présentées pour estimer les performances estivales des bâtiments. Les valeurs ainsi obtenues seront donc des minorants (le bâtiment serait probablement plus chaud en réalité pour éviter ces épisodes de sur-refroidissement).

L'ajustement des scénarios d'occultations et d'aération est essentiel sous peine de fausser l'estimation des impacts des différentes variantes (climat, enveloppe, etc.). En effet, un impact défavorable d'une variante sur les températures intérieures que l'on estimerait sans modifier ces scénarios pourrait en partie être compensé par une extension des périodes d'occultations et/ou d'aération.

Les profils d'utilisation quotidien des occultations par orientation et de l'aération sont les mêmes que ceux définis dans le rendu 1.3. Rappelons seulement, que les occultations sont systématiquement fermées la nuit et les week-ends par mesure anti-intrusion, ce qui s'avère être une contrainte pour le comportement passif du bâtiment (impossibilité de profiter des apports solaires les week-ends).

## 1.2 Définition de l'équivalent résidentiel

Le LowCal a été conçu de sorte que son usage puisse être évolutif, c'est-à-dire convertible en bâtiment de logements. Pour cela, le découpage proposé par l'architecte en ce sens a été repris : chaque niveau contient un T2 et deux T3. Ce changement d'usage aura des répercussions évidentes sur les scénarios d'usage du bâtiment et donc sur le comportement thermique du bâtiment.

La variante ainsi définie sera désignée par *LowCal-Résidentiel*.

### 1.2.1 Agencement intérieur et zonage

Le cloisonnement intérieur est forcément modifié par rapport au LowCal et en conséquence le zonage aussi. Les plans sont donnés en annexe. Les T2 contiennent 3 zones (salon/cuisine, chambre, salle de bain) tandis que les T3 en contiennent 5 (salon/cuisine, 2 chambres, salle de bain, dégagement). Le rez-de-jardin sert quant à lui de cave/rangement et ne sera en conséquence pas étudié dans la suite.

Nous reproduisons ci-dessous les plans réalisés par l'architecte du LowCal, le cabinet Pierre Traversier, dans leur version anticipant une reconversion possible en logement (stade DCE) :

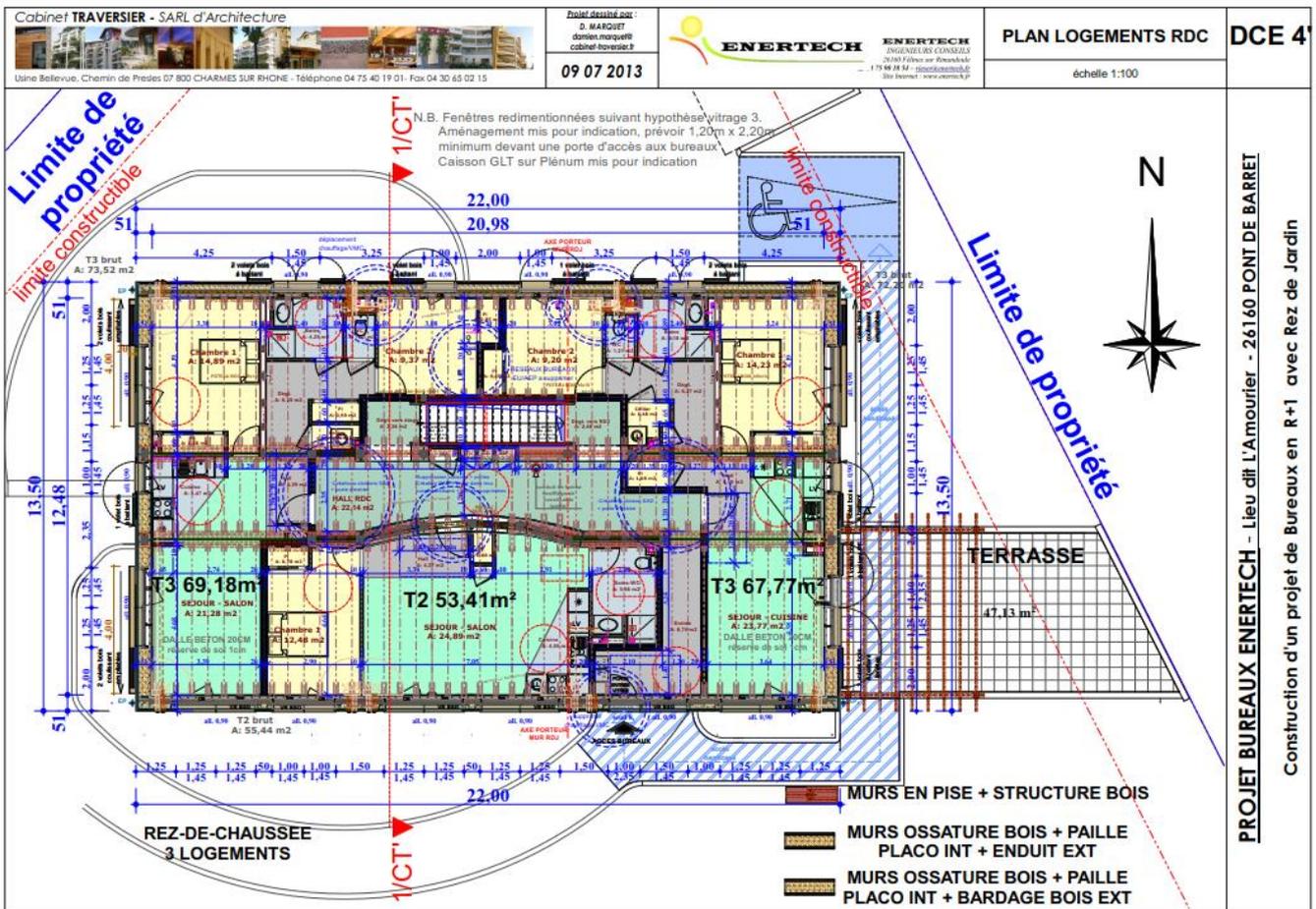


Figure 1.2.a Plan d'aménagement prévu pour une reconversion possible en logement - RdC

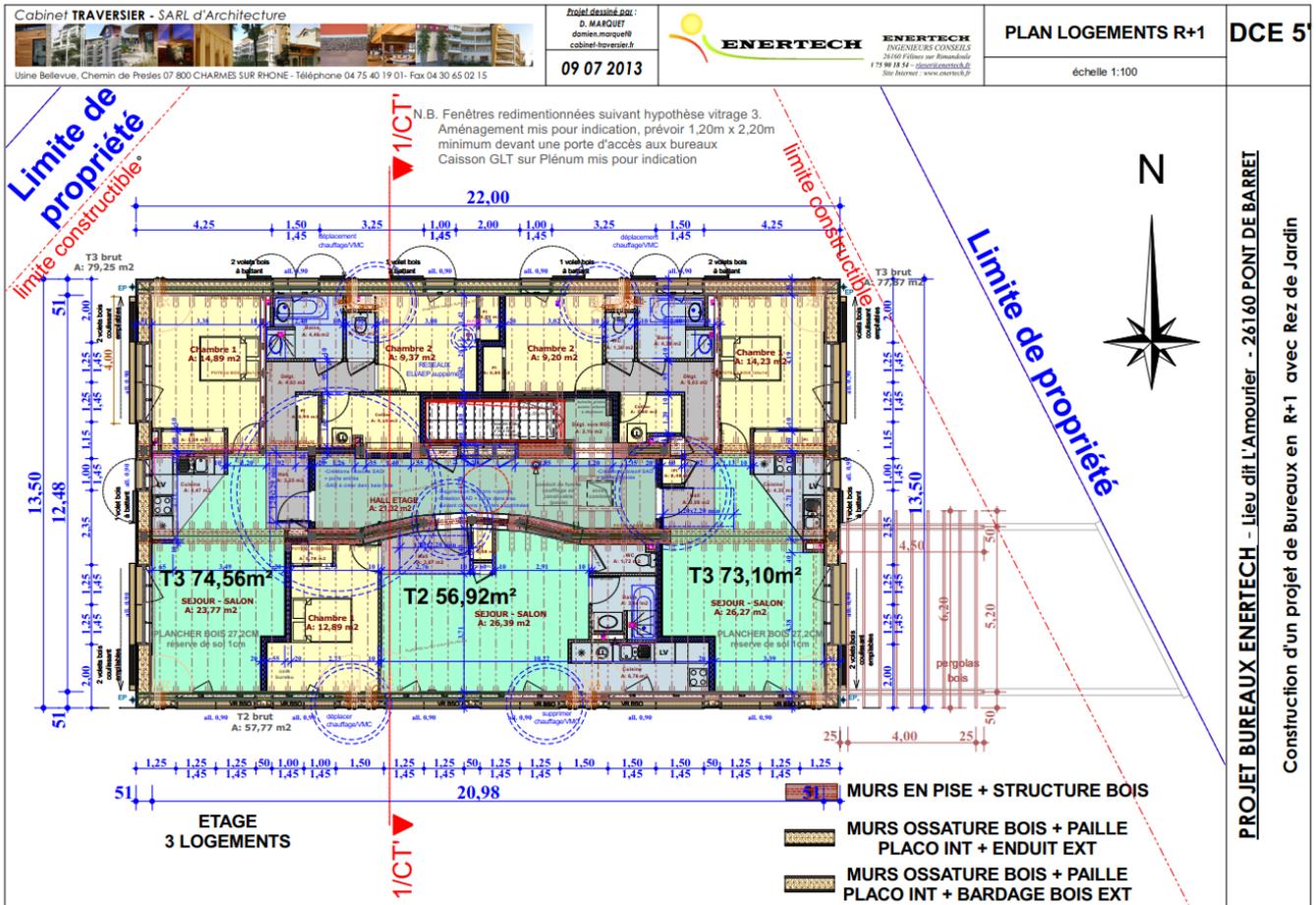


Figure 1.2.b Plan d'aménagement prévu pour une reconversion possible en logement – R+1

**1.2.2 Ventilation**

Les entrées et sorties d'air des ventilations décentralisées existantes doivent aussi être modifiées pour s'adapter à ce changement. Les modifications sont indiquées sur les plans en annexe. Elles ont été retenues de sorte à s'appuyant au maximum sur les unités existantes tout en assurant un balayage suffisant (voir plans). Les débits par unité sont de 36 m<sup>3</sup>/h en base, et peuvent doubler en cas de besoin.

**1.2.3 Modification de la composition – cloisons mitoyennes**

Pour respecter les normes acoustiques<sup>5</sup> afférant au résidentiel, les cloisons inter-logements ne peuvent pas être du même type que celles du LowCal. Les cloisons retenues sont de type Placostil® SAD 160-180. Ces cloisons sont du même type que les cloisons fines du LowCal mise à part que les épaisseurs des plaques de plâtres et de l'isolant sont doublées.

<sup>5</sup> En cas de reproduction du concept, il conviendrait en plus de concevoir autrement la dalle des combles pour éviter les « ponts phoniques » au niveau des liaisons cloison-dalle (soit monter les cloisons en refend pour cloisonner les dalles (non filantes), soit ajouter un faux-plafond (mais perte inertie))

### 1.2.4 Modèle d'occupation

Afin de s'affranchir de définitions de scénarios usuels non représentatifs de la grande variabilité de comportement des usagers, le **module AMAPOLA** de l'outil Pléiades a été utilisé pour générer les scénarios d'apports internes, de température de consigne et d'occultation. Un nombre suffisant de scénarios d'occupation peut ainsi être testé de sorte à obtenir une statistique des résultats suffisamment fiable.

Avec la version utilisée, l'aération n'a pas pu être gérée avec cette gestion stochastique des scénarios. En conséquence, celle-ci est supposée gérée automatiquement en fonction des températures intérieures et extérieures.

## 2 Etudes

### 2.1 Comparaison tertiaire-résidentiel

#### 2.1.1 Besoins de chauffage

A partir de la multitude de scénarios d'occupations testée et simulée, nous obtenons la répartition statistique des besoins de chaleur suivante :

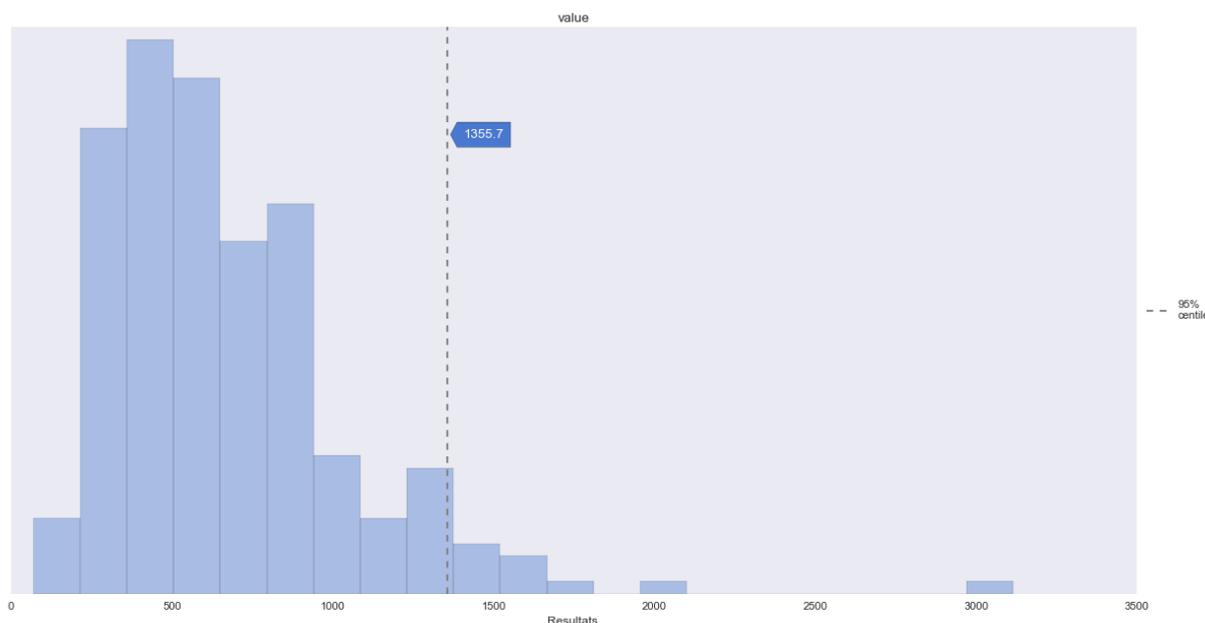


Figure 2.1. Répartition statistique des besoins de chauffage du LowCal résidentiel (en kWh) pour le climat de Pont de Barret (26).

Les besoins s'étalent donc de 0,1 à 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/an pour l'ensemble du bâtiment avec une moyenne à 1,1 kWh/m<sup>2</sup>/an (les T2 systématiquement mono-orientés au Sud étant les plus favorisés). Ces résultats sont donc généralement bien inférieurs à ceux du LowCal (3,6 kWh/m<sup>2</sup>/an dans la version de bureaux générique, voir dans la suite) et viennent largement conforter le concept « sans système centralisé de chauffage ».

Ces besoins de chauffage inférieurs à ceux du LowCal s'expliquent par des apports internes plus importants (équipements électriques, occupation nocturne et en week-end) qui compensent donc l'usage continu de la ventilation et la température de consigne en moyenne plus élevée).

### 2.1.2 Inconfort d'été

Les fonctionnalités de l'outil ne permettent malheureusement pas d'effectuer une analyse détaillée de l'inconfort. Il est toutefois possible d'identifier que les températures maximales moyennes dépassent allègrement les 37°C ce qui n'est évidemment pas confortable mais qui met en évidence la nécessité d'adopter un comportement particulier et actif pour limiter les surchauffes<sup>6</sup>. Rappelons pour mémoire qu'il est en effet essentiel :

- de maîtriser les apports internes (l'usage des appareils électriques inutiles) ;
- de limiter les apports solaires par un usage systématique des occultations ;
- d'aérer la nuit pour évacuer la chaleur et stocker la fraîcheur.

Une bonne gestion de ces éléments permet, comme mis en évidence dans la suite, de limiter drastiquement l'inconfort.

## 2.2 Changement de climat pour l'usage de bureaux

Pour des bâtiments bio-climatiques, comme le LowCal, le climat joue un rôle essentiel. En effet, la conception de celui-ci a été optimisée pour le climat de son lieu d'implémentation.

En vue de sa généralisation, il est donc intéressant d'étudier son comportement thermique sous d'autres climats français pour voir s'il s'y avère aussi adapté ou pas et, le cas échéant, d'identifier les paramètres de conception à optimiser.

### 2.2.1 Climats sélectionnés

Pour le LowCal de référence, nous ne nous baserons plus sur la météo mesurée sur site, mais sur le climat générique le plus proche : celui de Montélimar. Son climat, méditerranéen continental, se caractérise par un hiver froid mais ensoleillé et un été très chaud.

3 autres climats ont été sélectionnés de sorte à couvrir un panel diversifié de caractéristiques climatiques :

- Marseille – Climat méditerranéen : hiver doux et très ensoleillé et été très chaud mais bénéficie de l'inertie de la mer ;
- Strasbourg – Climat continental : hiver très froid et peu ensoleillé et été chaud à très chaud ;
- Lille – Climat océanique : hiver froid et peu ensoleillé et été frais.

Il est aussi intéressant d'étudier le comportement du LowCal à long terme, notamment face au réchauffement climatique, afin d'étudier sa résilience et potentiellement de déterminer les paramètres de conception à modifier en prévision.

### 2.2.2 Caractérisation des climats

Pour caractériser plus finement ces climats, notamment en perspective de l'analyse du comportement thermique du bâtiment, 6 indicateurs ont été définis.

Tout d'abord, les périodes froides (nécessitant a priori des besoins de chauffages) ont été distinguées des périodes chaudes (nécessitant a priori des besoins rafraichissement) de la sorte :

---

<sup>6</sup> Par ailleurs, les statistiques utilisées pour générer les scénarios ne sont pas spécifiques aux bâtiments passifs et donc probablement défavorables.

- Un jour est considéré froid si sa température minimale descend en dessous de 20°C.
- Un jour est considéré chaud si sa température maximale dépasse 28°C.

Cette distinction permet de définir des périodes intrinsèques aux climats.

Pour caractériser et comparer les périodes froides sont utilisés :

- Les écarts cumulés positif sur ces périodes entre 20°C et la température extérieure, exprimés en °C.jour, donnant une indication de la rigueur (intensité et durée) du froid et donc du besoin de chauffage ;
- Les flux solaires globaux horizontaux moyens sur ces périodes, exprimés en W/m<sup>2</sup>, donnant une idée du potentiel de chauffage passif.

Pour caractériser et comparer les périodes chaudes sont utilisés :

- Les écarts cumulés positif sur ces périodes entre la température extérieure et 26°C, exprimés en °C.jour, donnant une indication de la rigueur (intensité et durée) de la chaleur et donc du besoin de rafraîchissement ;
- Les températures maximales sur ces périodes, exprimées en °C, donnant une idée de leur intensité maximale ;
- Les amplitudes quotidiennes moyennes, exprimées en °C, donnant une idée du potentiel de refroidissement nocturne ;
- Les flux solaires globaux horizontaux moyens sur ces périodes, exprimés en W/m<sup>2</sup>, donnant une idée des sources de surchauffe.

La figure suivante donne la valeur de ces différents indicateurs pour les climats représentatifs, dits « moyens<sup>7</sup> », des sites sélectionnés, issues de la base Météonorm.

	Jours froids		Jours chauds			
	Rigueur	Apports solaires	Rigueur	Intensité max.	Amplitude quotidienne moyenne	Apports solaires
	°C.jour	W/m <sup>2</sup>	°C.jour	°C	°C	W/m <sup>2</sup>
Montelimar	2459.2	140.9	73.6	35.6	11.2	250.0
Marseille	2089.4	150.8	86.3	35.2	9.5	260.6
Strasbourg	3115.4	113.4	25.8	34.0	11.7	204.2
Lille	3190.7	104.1	7.1	31.6	11.8	232.2

Figure 2.2.2.a – Indicateurs climatiques pour les climats « moyens ».

On observe que ces indicateurs confirment les descriptions effectuées lors de la sélection des climats. En complément, la rigueur hivernale plus élevée du climat Lillois par rapport à Strasbourg s'explique par la durée plus importante des jours de froid (et non pas par une intensité plus importante). L'inertie apportée par la mer au climat marseillais explique l'amplitude de température plus faible par rapport aux autres climats et le pic de température plus faible par rapport au climat de Montélimar.

Toutefois, pour l'étude du LowCal, nous utiliserons aussi les climats dits « été chaud<sup>8</sup> » (figure 2.1.1.b), pour le tester en condition estival critique, car ces épisodes sont dimensionnants pour sa conception vis-à-vis du confort d'été. Ce choix a un impact bien moindre sur les jours froids.

<sup>7</sup> Températures moyennes mensuelles sur 10 ans (2000-2009).

<sup>8</sup> Températures maximales mensuelles sur 10 ans (2000-2009) pour la période estivale (de mai à septembre).

	Jours froids		Jours chauds			
	Rigueur	Apports solaires	Rigueur	Intensité max.	Amplitude quotidienne moyenne	Apports solaires
	°C.jour	W/m <sup>2</sup>	°C.jour	°C	°C	W/m <sup>2</sup>
Montelimar	2321.5	132.7	143.8	38.0	11.0	247.7
Marseille	2002.6	143.7	162.5	36.9	9.5	262.3
Strasbourg	2906.6	111.7	72.4	36.3	11.7	219.5
Lille	2962.6	103.4	16.5	33.2	11.8	225.1
	Variations		Variations			
Montelimar	-6%	-6%	95%	7%	-2%	-1%
Marseille	-4%	-5%	88%	5%	0%	1%
Strasbourg	-7%	-2%	180%	7%	0%	8%
Lille	-7%	-1%	132%	5%	-1%	-3%

Figure 2.2.2.b – Indicateurs climatiques pour les climats « été chaud » et variations par rapport aux climats « moyens ».

Pour l'étude du réchauffement climatique, les projections des différents climats pour 2070<sup>9</sup> pour le scénario A1B<sup>10</sup> de Météonorm ont été sélectionnées. La Figure 2.2.2.c les décrit suivant les indicateurs climatiques définis précédemment.

	Jours froids		Jours chauds			
	Rigueur	Apports solaires	Rigueur	Intensité max.	Amplitude quotidienne moyenne	Apports solaires
	°C.jour	W/m <sup>2</sup>	°C.jour	°C	°C	W/m <sup>2</sup>
Montelimar	1903.7	141.2	187.0	39.2	10.5	262.4
Marseille	1668.3	140.6	182.0	36.7	9.5	258.7
Strasbourg	1298.8	120.3	264.3	40.1	8.9	236.5
Lille	2621.2	106.7	33.5	34.9	10.7	216.6
	Variations		Variations			
Montelimar	-18%	6%	30%	3%	-5%	6%
Marseille	-17%	-2%	12%	-1%	0%	-1%
Strasbourg	-55%	8%	265%	11%	-24%	8%
Lille	-12%	3%	103%	5%	-9%	-4%

Figure 2.2.2.c – Indicateurs climatiques pour les climats « 2070 » et variations par rapport aux climats « été chaud ».

On observe que le réchauffement climatique projeté aurait tendance à réduire sensiblement la rigueur des jours froids et à l'augmenter plus fortement encore pour les jours chauds. Ces impacts seraient notablement plus importants pour le climat continental de Strasbourg qui deviendrait à la fois le moins froid et le plus chaud. On observe que Marseille ne serait pas touché par une augmentation des températures maximales ni par une diminution des amplitudes de température, probablement grâce à l'influence maritime. Il est notable de remarquer que les étés devraient être plus critiques à Montélimar

<sup>9</sup> De la même façon que les climats « moyens » il s'agit de données représentatives à cette période et non d'une année particulière.

<sup>10</sup> Croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète, population mondiale atteignant un maximum de 9 milliards d'individus au milieu du siècle pour décliner ensuite, nouvelles technologies énergétiquement efficaces introduites rapidement (utilisation des différentes sources énergétiques sans en privilégier une en particulier). Conduirait approximativement à une augmentation de 2,5°C de la température moyenne.

et Strasbourg qu'à Marseille, inversant la situation actuelle. Quant à eux, les flux solaires ne devraient pas changer considérablement.

### 2.2.3 Résultats et généralisation

#### Critères d'analyses

Le bâtiment LowCal générique (usage de bureaux) a été évalué sous les différents climats. La performance est estimée pour les périodes froides et chaudes respectivement et est caractérisée différemment étant donné l'absence de système de rafraîchissement.

Le comportement hivernal est caractérisé par le besoin total de chauffage pour maintenir une température de 20°C. Celui-ci est calculé sans scénario d'occultation (hormis nuit et week-end par mesure anti-intrusion) et d'aération et pour une température de consigne estivale fixée à 26°C. Les besoins de chauffage ainsi estimés pourraient être réduits en automne en surchauffant le bâtiment au-dessus de 23°C en période estivale grâce à l'inertie saisonnière, mais engendrerait plus d'inconfort. Inversement, une mauvaise gestion en période automnale (sur-refroidissement) augmenterait le besoin de chaleur. Ainsi les valeurs estimées tel que décrit plus haut peut être considérées comme des minorants.

Le comportement estival est caractérisé par le nombre d'heure d'inconfort cumulé maximal atteint dans le bâtiment. Une zone étant jugée inconfortable lorsque sa température opérative dépasse une valeur seuil déterminée de deux façons différentes :

- (1) Fixé à 28°C ;
- (2) Calculé de sorte à prendre en compte l'adaptation des occupants selon la norme NF EN 15251<sup>11</sup>.

Ces deux choix permettent a priori de borner l'inconfort dans le cas d'utilisation de modèle d'adaptation plus détaillé, le premier étant le plus défavorable et le second le plus favorable. Rappelons ici pour avoir un ordre d'idée qu'un brasseur d'air peut diminuer le ressenti d'environ 3°C<sup>12</sup>.

Ce temps d'inconfort est complété par le dépassement maximal et l'inconfort cumulé maximal (dépassement fois durée) atteint dans le bâtiment. Ces indicateurs sont obtenus selon la méthodologie définie en 1.1.2<sup>13</sup>. Il s'agit donc là aussi de minorants, car comme indiqué plus haut, des périodes de sur-refroidissement peuvent apparaître.

#### Analyse

Résultats pour les fichiers météo « moyens » :

---

<sup>11</sup> La limite haute est une fonction affine de la température extérieure moyenne glissante pondérée exponentiellement : la limite augmente de confort augmente lorsque la température extérieure augmente, mais en proportion plus faible.

<sup>12</sup> D'après les normes NF EN 15251 et NF EN ISO 7730.

<sup>13</sup> Les inconforts apparaissant en hiver ou en mi-saison lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure ont été supprimés, car ceux-ci peuvent être évités par aération. Ces aérations ponctuelles, peut impactante sur le comportement global du bâtiment, n'ont pas été modélisées afin de limiter le temps de paramétrisation des modèles.

	Froid	Chaud					
		Confort < 28°C			Confort adaptatif (NF EN 15251)		
		Durée d'inconfort max.	Dépassement max.	Inconfort cumulé	Durée d'inconfort max.	Dépassement max.	Inconfort cumulé
kWh/m²/an	h	°C	°C.h	h	°C	°C.h	
Montelimar	3.6	5.0	2.3	5.2	3.0	1.9	3.3
Marseille	1.2	8.0	1.0	4.4	2.0	0.6	0.9
Strasbourg	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lille	7.6	1.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0

Figure 2.2.3.a – Indicateurs de performance du bâti pour les climats « moyens ».

On observe tout d'abord que les besoins calorifiques du bâtiment suivent la rigueur « hivernale » des climats, à ceci près que le besoin s'avère plus important pour Strasbourg que pour Lille alors que la rigueur y est moins importante. Cette différence s'explique par le fait que le froid est moins intense mais plus prolongé à Lille et que cela joue en la faveur d'un chauffage solaire passif (les apports solaires parviennent à compenser les déperditions engendrées par des écarts de température suffisamment faibles).

En termes d'inconfort, sa durée est plus importante à Marseille, car son climat cumule la plus forte rigueur « estivale », le plus faible potentiel de refroidissement et le plus fort ensoleillement. Cependant, l'intensité (dépassement) est plus forte à Montélimar à cause de pics de températures plus importants. Cet indicateur s'avère prépondérant car l'inconfort cumulé est en définitive le plus important à Montélimar. La faible rigueur estivale des climats de Lille et Strasbourg fait que l'inconfort y est nul ou négligeable. La prise en compte du potentiel d'adaptation des occupants réduit fortement ces inconforts, notamment à Marseille, où l'inertie due à l'influence de la mer (amplitudes moins importantes) se prête mieux à l'adaptation.

#### Résultats pour les fichiers météo « été chaud » :

	Froid	Chaud					
		Confort < 28°C			Confort adaptatif (NF EN 15251)		
		Durée d'inconfort max.	Dépassement max.	Inconfort cumulé	Durée d'inconfort max.	Dépassement max.	Inconfort cumulé
kWh/m²/an	h	°C	°C.h	h	°C	°C.h	
Montelimar	3.5	88.0	4.2	49.7	11.0	3.0	9.8
Marseille	1.1	309.0	2.8	219.9	10.0	1.7	6.4
Strasbourg	7.9	3.0	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0
Lille	7.4	1.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
Variations		Variations					
Montelimar	-3%	1660%	83%	856%	267%	58%	197%
Marseille	-2%	3763%	180%	4898%	400%	183%	611%
Strasbourg	-2%	-	-	-	0%	0%	0%
Lille	-3%	0%	150%	150%	0%	0%	0%

Figure 2.2.3.b – Indicateurs de performance du bâti pour les climats « été chaud » et variations par rapport aux climats « moyens ».

Lors d'été particulièrement chaud, l'inconfort est sensiblement augmenté, notamment à Montélimar et à Marseille en termes d'intensité et de durée. Ce dernier critère prenant cette fois-ci le dessus en termes

d'inconfort cumulé. Toutefois, les pics y étant plus faibles, les occupants sembleraient pouvoir bien mieux s'y adapter qu'à Montélimar. Par ailleurs, ces événements restants ponctuels à Lille et Strasbourg, l'inconfort reste négligeable.

### Résultats pour les fichiers météo « 2070 » :

	Froid	Chaud					
		Confort < 28°C			Confort adaptatif (NF EN 15251)		
		Besoin calorifique	Durée d'inconfort max.	Dépassement max.	Inconfort cumulé	Durée d'inconfort max.	Dépassement max.
kWh/m <sup>2</sup> /an	h	°C	°C.h	h	°C	°C.h	
Montelimar	1.3	261.0	4.1	293.3	25.0	2.9	19.8
Marseille	0.5	323.0	3.2	305.3	15.0	1.7	11.3
Strasbourg	0.7	136.0	4.6	201.5	17.0	3.7	16.2
Lille	5.2	2.0	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0
	Variations	Variations					
Montelimar	-62%	197%	-2%	490%	127%	-3%	102%
Marseille	-60%	5%	14%	39%	0%	0%	0%
Strasbourg	-91%	4433%	1050%	28686%	-	-	-
Lille	-30%	100%	80%	100%	0%	0%	0%

Figure 2.2.3.c – Indicateurs de performance du bâti pour les climats « 2070 » et variations par rapport aux climats « été chaud ».

Suivant la projection en 2070, les besoins calorifiques sont considérablement réduits (de -30 à -90%), justifiant d'autant plus le choix fait dans le concept « sans chauffage » du LowCal.

L'inconfort reste négligeable à Lille mais augmente considérablement à Strasbourg, dépassant les niveaux de Montélimar en été chaud. L'inconfort cumulé, reste plus important à Marseille, mais là encore l'adaptation permettrait de moins en souffrir, contrairement à Montélimar où l'inconfort cumulé y atteint des valeurs semblables et où le potentiel d'adaptation s'avère plus faible. En définitive, les pics de températures et leur fréquence s'avèrent plus contraignant pour le confort intérieur que la température moyenne.

### Généralisation - climat

Les études menées sur les différents climats nous permettent de faire ressortir quelques tendances.

Pour les besoins de chauffage, nous avons vu que ceux-ci étaient relativement liées à la rigueur hivernale en première approximation et aux apports solaires en second ordre. Il est possible de placer les différents besoins estimés selon ces deux caractéristiques du climat comme cela est fait dans la figure 2.2.3.d. Les différents points correspondent aux différents cas étudiés. Le diamètre de ces points est proportionnel aux besoins calculés. La couleur de ces points correspond aux différents climats : en gris Montélimar, en orange Marseille, en vert Strasbourg, en bleu Lille. La clarté des couleurs correspond aux différentes variantes de ces climats : le plus clair pour le climat moyen, le niveau intermédiaire pour l'été chaud et le plus sombre pour 2070.

Pour faciliter l'extrapolation de ces résultats à d'autres climats, ceux-ci ont été interpolés en nuance de rouge.

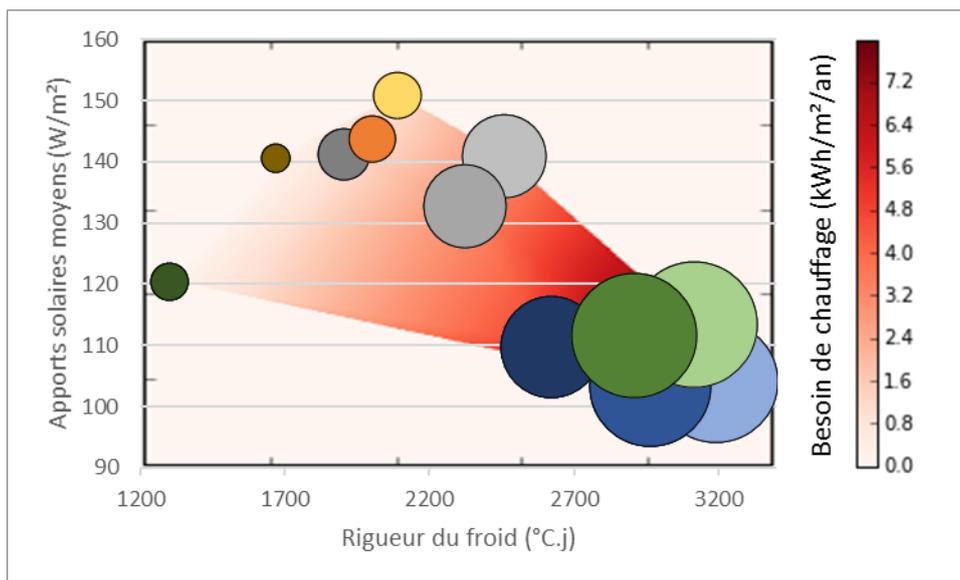


Figure 2.2.3.d – Généralisation des besoins de chauffage du LowCal selon la rigueur du climat et les apports solaires hivernaux moyens.

Pour ce qui est du comportement estival, il est bien plus difficile d’extraire une tendance car celui-ci est intrinsèquement dynamique et de nombreux paramètres rentrent en compte. Toutefois, il apparaît que la température extérieure maximale et la rigueur estivale permettent de caractériser relativement bien l’intensité de l’inconfort (Figure 2.2.3.e).

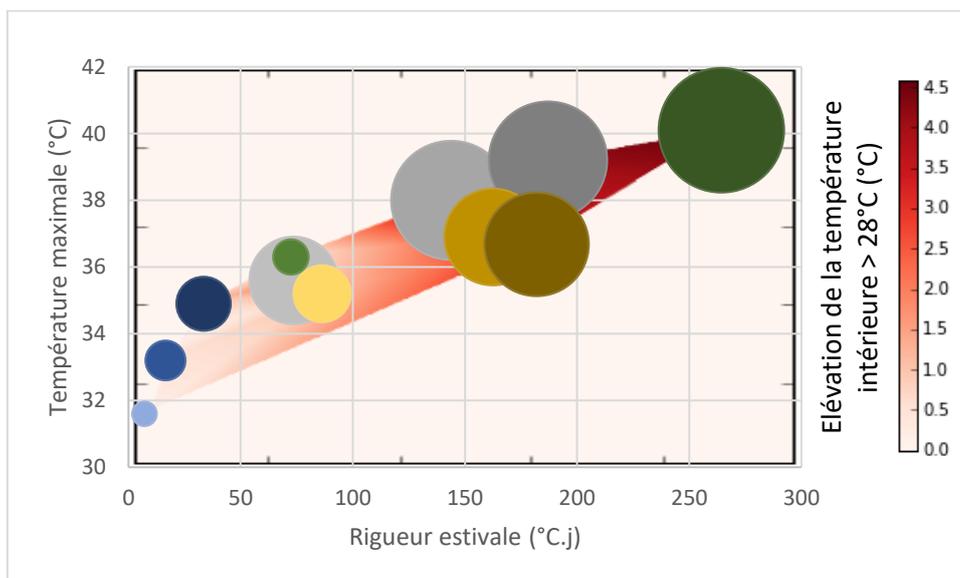


Figure 2.2.3.e – Généralisation de l’intensité d’inconfort du LowCal selon la rigueur du climat et la température extérieure maximale.

A partir de ces résultats il est possible d’extrapoler le comportement du LowCal en milieu urbain. Supposons le cas Marseillais, une baisse de 20% des apports solaires (masques des bâtiments voisins) et une diminution de la rigueur du froid de 900°C.j (îlot de chaleur urbain de 1°C sur 3 mois). D’après la figure 2.2.3.d, cela conduirait à un besoin quasiment inchangé. En été, l’environnement urbain augmenterait les températures maximales et la rigueur, tous deux contribuant à augmenter l’inconfort.

### *Généralisation – usage résidentiel*

Le changement de climat n'a pas été étudié spécifiquement pour la variante résidentielle car les tendances observées précédemment concernant le comportement du bâtiment peuvent facilement être extrapolées.

Comme vu en 2.1, les besoins de chauffage auront tendances à être encore plus faibles et donc potentiellement nuls pour tous les climats sauf Lille en 2070. En revanche, l'inconfort sera bien plus critique, y compris en considérant le potentiel d'adaptation. La maîtrise des consommations électriques s'avèrera d'autant plus importante.

## **2.3 Zoom sur les périodes critiques**

L'étude de climats représentatifs permet de tirer des enseignements concernant le comportement moyen du LowCal, mais ne permet pas d'étudier des séquences météorologiques spécifiques. Or, certains évènements mettent à rude épreuve le comportement passif du LowCal. Ceux-ci sont donc étudiés plus en détail ici.

### **2.3.1 Période caniculaire**

Les périodes les plus critiques pour le confort d'été sont les périodes caniculaires qui cumulent fort ensoleillement et hautes températures, de surcroît sur de longues périodes avec des minimales relativement élevées, ce qui est défavorable pour l'inertie à long terme (accumulation de chaleur et réduction du potentiel de rafraîchissement).

#### *Méthodologie*

Les données météo utilisées ne sont pas aptes à considérer précisément ces évènements ponctuels car elles se basent sur des données moyennées sur plusieurs années. Ces évènements sont donc lissés. Pour les étudier en détail nous avons utilisé plusieurs séquences théoriques de 20 jours<sup>14</sup> (3 semaines) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- (1) Température maximale : 38°C ; température minimale 20°C ; flux solaires maximaux.
- (2) Température maximale : 38°C ; température minimale 25°C ; flux solaires maximaux.
- (3) Température maximale : 38°C ; température minimale 30°C ; flux solaires maximaux.

Avant chacune d'entre elles, la température intérieure est initialisée à 20°C.

Ces séries nous permettent de mettre en évidence la limite du potentiel de rafraîchissement via l'aération nocturne lors de ce type de période.

#### *Résultats*

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous, pour la température intérieure maximale qui correspond majoritairement à la zone 11 (l'accueil). Ces évolutions peuvent être approximées par la fonction suivante<sup>15</sup> :

---

<sup>14</sup> Les scénarios ne comportent que des jours ouvrés pour se placer en situation critique.

<sup>15</sup> Montée en température d'un solide à température homogène soumis à un échelon de température.

$$T_{moy} = T_i + (T_l - T_i) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

avec  $T_{moy}$  la température maximale journalière moyenne,  $T_i$  la température initiale,  $T_l$  la température limite d'équilibre et  $\tau$  la constante de temps du bâtiment liée à l'inertie. La température de départ peut être réécrite de la sorte :  $T_i = T_{init} + \Delta T_i$  avec  $T_{init}$  la température d'initialisation et  $\Delta T_i$  l'élévation initiale de température.

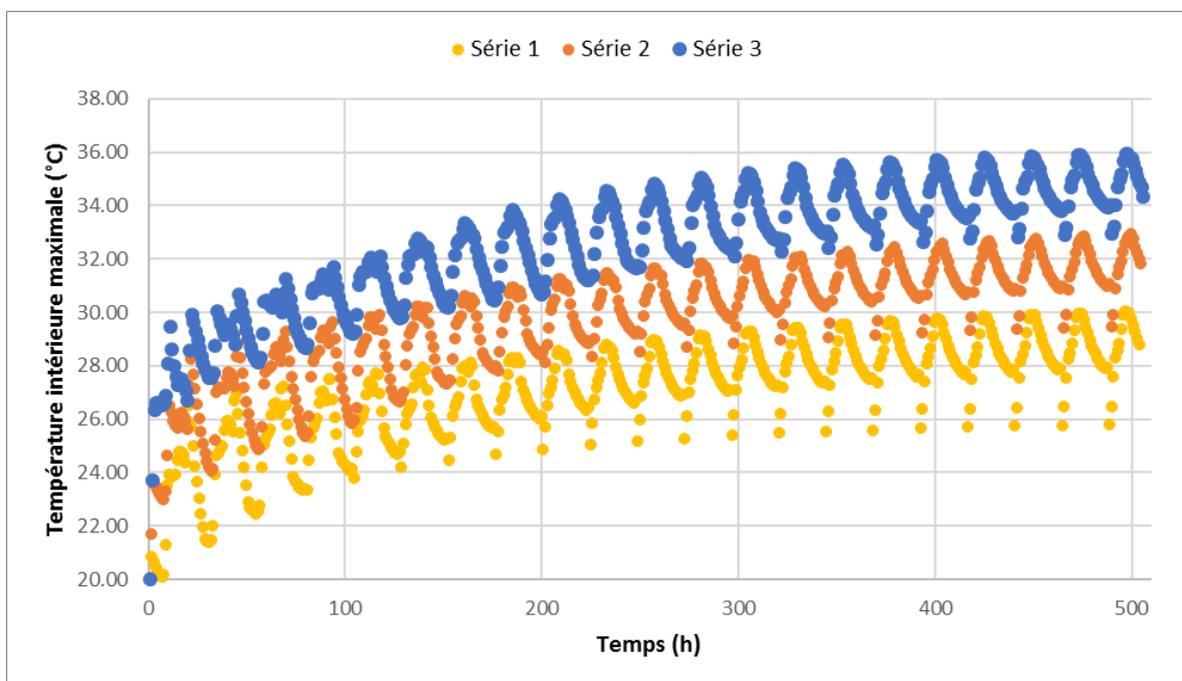


Figure 2.3.1.a - Evolution de la température intérieure maximale selon les différentes séries caniculaires.

La calibration de ces différents paramètres à partir des données de simulation donne les valeurs suivantes pour les différentes séries :

Paramètre	Série 1	Série 2	Série 3
$T_l$ (°C)	29,3	32,5	35,4
$\Delta T_i$ (°C)	3,4	5,5	7,6
$\tau$ (jour)	8,7	9,2	8,5

Figure 2.3.1.b – Valeurs calibrées des paramètres.

On observe que la température d'équilibre  $T_l$  augmente avec la réduction du potentiel de rafraîchissement via l'aération nocturne (augmentation de la température minimale). Pour le confort intérieur, une minimale de 20°C s'avère déjà limite à terme pour compenser des pics journaliers de 38°C. Cette température limite peut être estimée avec le bilan énergétique journalier suivant<sup>16</sup> :

$$AI + AS + AP + EA = 0$$

avec  $AI$  les apports internes journaliers,  $AS$  les apports solaires journaliers,  $AP$  les apports journaliers des parois et  $EA$  l'énergie extraite par l'aération nocturne (exprimées en kWh dans la suite).

<sup>16</sup> On néglige ici les apports solaires via les parois opaques et la contribution de la ventilation, et on considère que les apports solaires réchauffent exclusivement le volume d'air, ce qui est valable pour les bâtiments fortement isolés.

Les deux premiers dépendent des conditions d'entrées, les deux derniers peuvent être fortement approximés<sup>17</sup> comme suit :

$$AP = D \cdot \left( \frac{T_{max-ext} + T_{min-ext}}{2} - T_l \right) \cdot t_j$$

avec,  $D$  le coefficient de déperdition (W/K) et  $t_j$  la durée du jour (h).

$$EA = Qv \cdot \rho \cdot c_{p-air} \cdot (T_{min-ext} - T_l) \cdot t_{aé}$$

Avec  $Qv$  le débit massique de renouvellement d'air (m<sup>3</sup>/h),  $\rho$  la masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>),  $c_{p-air}$  la capacité thermique de l'air (Wh/kg/K) et  $t_{aé}$  la durée de l'aération (h).

On en déduit :

$$T_l = \frac{AI + AS + D \cdot \frac{T_{max-ext} + T_{min-ext}}{2} \cdot t_j + Qv \cdot \rho \cdot c_{p-air} \cdot T_{min-ext} \cdot t_{aé}}{D \cdot t_j + Qv \cdot \rho \cdot c_{p-air} \cdot t_{aé}}$$

Cette formulation met en évidence que pour diminuer la température d'équilibre, il convient de diminuer les apports solaires et internes, limiter les déperditions qui fait tendre la température limite vers la température moyenne extérieure et augmenter l'aération pour tendre vers la température nocturne.

Concernant la temporalité de la montée en température, la constante de temps  $\tau$  nous donne les indications suivantes :

- Au bout de  $1 \tau$ , la température monte de 63% par rapport à la valeur d'équilibre.
- Au bout de  $3 \tau$ , la température monte de 95% par rapport à la valeur d'équilibre.

Cette constante de temps est globalement estimée de façon semblable pour les différentes séries, ce qui est logique car cette grandeur est intrinsèque au bâtiment ou à la zone considérée et caractérise son inertie séquentielle.

La constante de temps peut être estimée de la sorte :

$$\tau = \frac{I}{D}$$

avec  $I$  l'inertie séquentielle du bâtiment exprimée en Wh/K et  $D$  le taux de déperdition global du bâtiment exprimée en W/K.

Cette formulation met en évidence que l'augmentation de l'inertie et la diminution des déperditions permet de ralentir le réchauffement.

A partir des données d'entrées et des données disponibles grâce à la STD (récapitulées en annexe) et des équations établies, pour la zone la plus défavorable, on trouve :

Paramètre	Série 1	Série 2	Série 3
$T_l$ (°C)	29,7	33,3	36,8
$\tau$ (jour)	5,7		

Figure 2.3.1.c – Valeurs estimées à l'aide des formules.

On observe que ces estimations sont relativement proches des valeurs issues de la STD. Ces équations semblent donc relativement fiables pour estimer, en première approximation, le comportement du

<sup>17</sup> On suppose une température moyenne constante pour les déperditions et que l'air ventilé la nuit ressort à la température de masse (échange maximal).

bâtiment sur ces périodes critiques. La dynamique, via la constante de temps  $\tau$ , est plus subtile à estimer précisément car l'inertie est principalement sollicitée par l'intérieur (réchauffement par apports internes et solaires et rafraîchissement par aération) et non pas par l'extérieur à travers l'enveloppe comme c'est le cas en hiver (situation plus proche de la configuration permettant d'établir la formule). Seule la STD est apte à prendre en compte cette complexité.

### Potentiel d'aération

Etudions plus en détail le potentiel d'aération nocturne pour essayer d'en déterminer les limites.

La puissance prélevée par l'air aux murs s'exprime comme suit :

$$h \cdot S \cdot (T_{inert}(t) - T_{air}(t))$$

avec  $h$  le coefficient d'échange surfacique<sup>18</sup> (W/m<sup>2</sup>/K),  $S$  (m<sup>2</sup>) la surface inertielle interne (mur et dalle),  $T_{inert}$  sa température et  $T_{air}$  la température de l'air renouvelé au contact de la masse inertielle.

En prélevant cette puissance, l'air va se réchauffer. Etant donné la faible chaleur massique de l'air par rapport à la masse inertielle, on peut considérer que sur un pas de temps suffisamment court  $\delta t$  seule l'air se réchauffe, passant de la température extérieure  $T_{ext} = T_{air}^e$  en entrant à  $T_{air}^s$  en sortant. L'énergie absorbée lors de cet échauffement vaut :

$$Q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{air}^s(t) - T_{ext}(t)) \cdot \delta t$$

Sur l'intervalle  $\delta t$  en supposant la décroissance linéaire de la température de l'air renouvelé, on peut écrire :

$$Q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{air}^s(t) - T_{ext}(t)) \cdot \delta t = h \cdot S \cdot \left( T_{inert}(t) - \frac{T_{air}^s(t) + T_{ext}(t)}{2} \right) \cdot \delta t$$

On obtient ainsi :

$$T_{air}^s(t) = \frac{T_{ext}(t) \cdot \left( Q_v \cdot \rho \cdot c_p - \frac{h \cdot S}{2} \right) + h \cdot S \cdot T_{inert}(t)}{Q_v \cdot \rho \cdot c_p + \frac{h \cdot S}{2}}$$

On met ainsi en évidence que l'augmentation du débit de renouvellement d'air permet de faire tendre cette température vers  $T_{ext}$  et donc de maximiser l'écart de température entre mur et air en contact et donc le prélèvement d'énergie.

Si l'on suppose par ailleurs que le potentiel de l'air est complètement exploité (et donc que  $T_{air}^s(t) = T_{inert}(t)$ ) on obtient :

$$Q_v = \frac{h \cdot S}{2 \cdot \rho \cdot c_p}$$

En dessous de ce débit le renouvellement d'air est sous-efficace. Cette valeur peut donc être vue comme une limite basse du renouvellement d'air à assurer pour « décharger » thermiquement les murs.

L'énergie globale prélevée dépendra de l'écart de température cumulé, non prédictible simplement à cause des dynamiques de la température extérieure et de celle la masse inertielle. Là aussi la STD s'impose.

<sup>18</sup> A estimer avec la formule  $h = 4 + 4 \cdot v$  et  $v$  la vitesse de l'air exprimée en m/s, étant donné les importantes vitesses d'air.

Dans l'idéal, pour décharger l'ensemble de l'énergie accumulée dans une journée, il convient que le temps d'aération soit proche du temps de « charge » (lorsque le bâtiment est soumis aux apports solaires et internes) de sorte que l'inertie sollicitée soit la même (épaisseur de pénétration équivalente). Autrement, si le temps d'aération est plus court, on ne déchargera qu'en surface. Mais la chaleur restante en profondeur peut être compensée par un sur-refroidissement en surface<sup>19</sup>.

Si l'énergie extraite s'avère insuffisante, la masse s'échauffera progressivement. Cet échauffement augmentera l'écart de température entre masse et air et donc l'énergie prélevée, contribuant à l'atteinte d'une température moyenne d'équilibre plus élevée comme observé précédemment.

En définitive, comme l'a montré l'équation simplifiée précédente pour la température limite, l'aération permet au mieux d'évacuer les apports supplémentaires (internes et solaires) en tendant vers la température minimale. Pour cela, le renouvellement d'air doit être maximisé (valeur minimale identifiée). L'inertie ne joue a priori pas de rôle défavorable tant que l'aération est suffisante pour évacuer les surchauffes journalières. Elle permet au contraire d'atténuer les fluctuations journalières de température, de maintenir la fraîcheur nocturne et même de limiter l'élévation sur le long terme si celle-ci est suffisante. En revanche, il est évident que l'aération sera limitée de fait par la valeur des minimales. La meilleure façon de supporter des canicules sera donc de miser sur de l'inertie séquentielle (profonde) pour ralentir l'échauffement (et potentiellement de ne pas aérer si la température ainsi maintenue est suffisamment faible). Une inertie plus faible conduirait à des inconforts plus intenses (en termes de montée en température) mais sur des durées plus courtes et donc potentiellement plus fréquemment alors que l'analyse des différents climats (2.2.3) semblent montrer que l'on s'adapte mieux à une intensité plus faible sur des temps plus long.

### 2.3.2 Période froide sans ensoleillement

Les périodes les plus critiques pour le comportement passif en hiver sont les épisodes de froid prolongé sans ensoleillement. Le bâtiment décharge alors progressivement la chaleur accumulée sans moyen de la recharger.

#### Méthodologie

Pour modéliser ce type d'événement, nous avons utilisé plusieurs séquences théoriques de 20 jours (3 semaines) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- (1) Température maximale : 11°C ; température minimale 9°C ; flux solaires nuls.
- (2) Température maximale : 6°C ; température minimale 4°C ; flux solaires nuls.
- (3) Température maximale : 1°C ; température minimale -1°C ; flux solaires nuls.

Avant chacune d'entre elles, la température intérieure minimale est fixée à 20°C et l'initialisation se fait selon des séquences hivernales réelles du fichier météo de référence.

---

<sup>19</sup> Notons que l'aération augmente la vitesse d'air et donc le coefficient de décharge, ce qui, en diminuant la résistance superficielle augmente l'épaisseur de pénétration.

## Résultats

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous, pour la température intérieure minimale qui correspond majoritairement à la zone 4 (l'accueil). Ces évolutions peuvent être approximées de la même façon que précédemment.

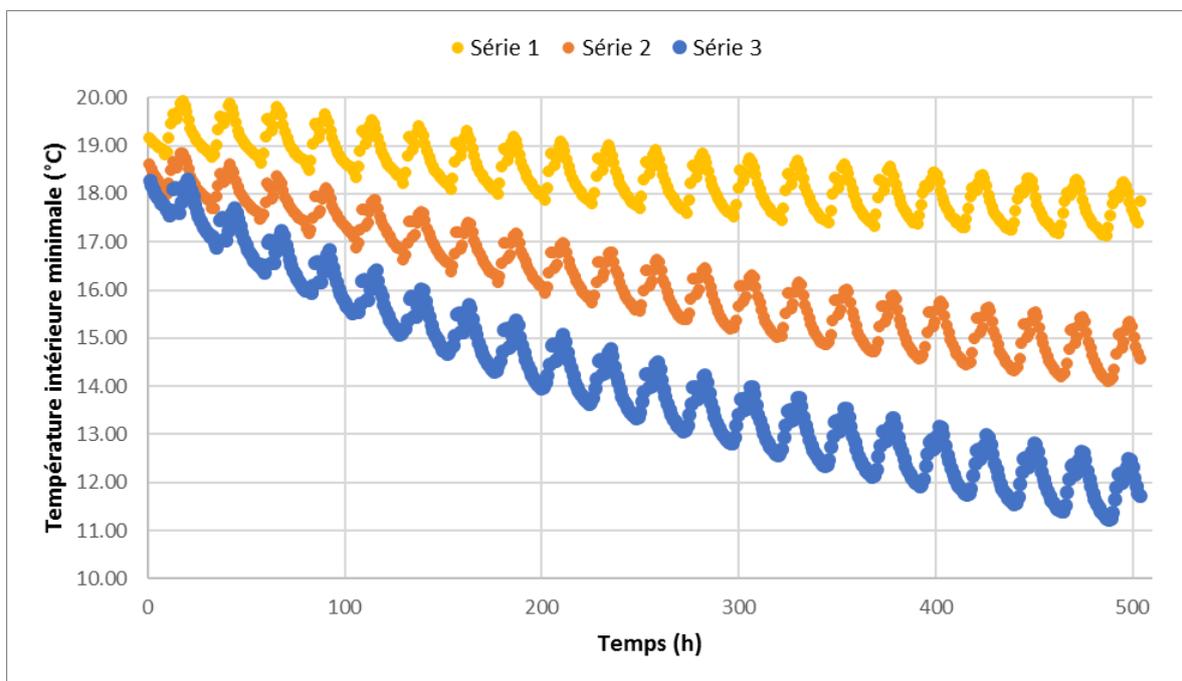


Figure 2.3.2.a – Evolution de la température intérieure minimale selon les différentes séries de périodes froides.

La calibration de ces différents paramètres donne les valeurs suivantes pour les différentes séries :

Paramètre	Série 1	Série 2	Série 3
$T_i$ (°C)	17,0	12,8	10,0
$\Delta T_i$ (°C)	0,4	1,3	1,8
$\tau$ (jour)	14,2	17,9	13,8

Figure 2.3.2.b – Valeurs calibrées des paramètres.

On remarque que le temps caractéristique est ici quasiment doublé par rapport aux estimations faites lors des périodes caniculaires. Cette différence pourrait s'expliquer par la différence d'épaisseur de pénétration et donc d'inertie sollicitée dû à la nature différente des sollicitations à laquelle est soumis le bâtiment. En effet, dans le cas des périodes caniculaires, l'inertie est sollicitée principalement par l'intérieur (flux solaire transmis et aération) alors que lors des périodes de grand froid c'est l'inverse (le bâtiment se décharge principalement à travers l'enveloppe vers l'extérieur). De plus, les flux solaires n'impactent pas ici l'inertie.

Les formules établies précédemment peuvent aussi être utilisée ici pour estimer les valeurs caractérisant le comportement du bâtiment. On observe cette fois que les estimations sont moins bonnes, mais donnent toujours un bon ordre de grandeur. Les paramètres d'entrées mériteraient d'être mieux connus ou estimés.

Paramètre	Série 1	Série 2	Série 3
$T_i$ (°C)	15,3	10,3	5,3
$\tau$ (jour)	5,7		

Figure 2.3.2.c – Valeurs estimées à l'aide des formules.

## 3 Optimisations

### 3.1 Principe

Après avoir testé le LowCal dans différentes configurations, étudions et questionnons sa conception :

- Est-il possible d'améliorer les performances du LowCal ? et si oui, comment ?
- La conception idéale du LowCal est-elle différente d'un climat à l'autre ? Si oui, qu'est-ce qui change ?

### 3.2 Méthodologie

Répondre à ces questions revient à mener des études d'optimisation sous deux critères :

- Minimisation des besoins de chauffage ;
- Minimisation de l'inconfort en période estival.

Les paramètres modifiés et les valeurs testées pour rechercher l'optimum sont récapitulés dans le tableau suivant. Notons que les paramètres liés aux fenêtres ont été distingués par orientation.

Paramètre		Modification par rapport au paramétrage d'origine
Inertie	Ajout d'une épaisseur de terre crue (enduit) sur les cloisons	+ 10 cm + 5 cm +1 cm
	Réduction de l'épaisseur des refends en terre crue	- 1 cm - 5 cm - 10 cm
Isolation des murs extérieurs	Modification de l'épaisseur d'isolant	+ 10 cm + 5 cm +1 cm - 1 cm - 5 cm - 10 cm
Coefficient de déperdition des menuiseries	Augmentation du coefficient de déperdition	+24% (1,09 → 1,35 W/m <sup>2</sup> /K)
Facteur solaire des menuiseries	Diminution du facteur solaire	-14% (0,391 → 0,337)
	Augmentation du facteur solaire	+19% (0,391 → 0,465)

Figure 3.2 - Plan d'expérience pour l'optimisation.

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé le module AMAPOLA de l'outil Pléiades. Mais les fonctionnalités actuelles ont engendré deux limites :

- (1) Il n'y a pas de moyen simple de modifier de façon globale la dimension de l'ensemble des fenêtres car celles-ci ne sont pas toutes de mêmes types. En conséquence l'impact de ce paramètre n'a pas été étudié<sup>20</sup>.
- (2) Les scénarios d'occultation ne peuvent pas être définis de façon automatique selon les conditions intérieures et extérieures<sup>21</sup> (contrairement à l'aération). En conséquence celles-ci ont été supposées utilisées comme pour le LowCal mais pendant toute l'année. Ce choix ne devant impacter que les besoins de chauffage et leur minimisation, avec ou sans occultation, couplée aux contraintes d'inconfort, devrait se traduire par les mêmes jeux de paramètres.

En revanche, les scénarios d'ouverture des fenêtres ont été supposés gérés automatiquement selon les conditions de température intérieure et extérieure contrairement au LowCal où l'ouverture est manuelle et en conséquence actionnable uniquement lors des périodes d'occupation (ouverture de la fermeture à l'ouverture en période estivale). Les résultats d'inconfort obtenus avec cette gestion automatique seront donc des minorants.

Rappelons que la mise à jour des scénarios d'occultation et d'aération avec les conditions internes du bâtiment (et donc pour chaque variante testée lors de l'optimisation) est indispensable (voir 1.1.2.d).

Seuls les climats de 2070 ont été étudiés, car ils s'avèrent les plus critiques, et du fait de la durée de vie du bâtiment.

La méthode d'optimisation d'AMAPOLA repose sur un algorithme génétique. Très brièvement, cette méthode permet d'explorer l'espace des paramètres en se focalisant sur les « caractères » les plus intéressants au sens des objectifs définis (sélection).

### 3.3 Résultats

Les caractéristiques détaillées des solutions optimales sont données en annexe. Il s'est avéré que quel que soit le climat considéré, **les meilleures solutions disposaient systématiquement d'une isolation renforcée** (+10 cm d'isolant) **et d'une inertie renforcée** (+10 cm de terre crue sur les cloisons internes). Ces deux caractéristiques permettent en effet de réduire les besoins de chauffage par réduction des déperditions et amélioration du stockage des apports solaires, et d'améliorer le confort d'été par atténuation des pics de température et amélioration du stockage de la fraîcheur nocturne.

Des nuances apparaissent toutefois pour les vitrages. Globalement, sur le front de Pareto (ensemble des solutions optimales vis-à-vis des deux critères retenus), l'augmentation des facteurs solaires permet logiquement de minimiser les besoins de chauffage mais se répercute sur l'inconfort, et inversement. Les tendances observées concernant les orientations à modifier prioritairement pour réduire l'inconfort est à généraliser avec précaution tant elles dépendent de la géométrie spécifique des zones étudiées. L'orientation Ouest apparaît toutefois logiquement comme la plus défavorable (notamment lorsqu'elle est couplée au Nord). L'importance de l'orientation Est est probablement renforcée par une occultation trop tardive dans les scénarios définis.

Enfin, on observe uniquement dans le cas le plus défavorable, Strasbourg-2070, que l'augmentation du coefficient de déperdition de certains vitrages (Nord et Sud) permet d'améliorer le confort. Ceci pourrait s'expliquer par la forte intensité des inconforts et donc de la favorisation des sources de rafraîchissement.

---

<sup>20</sup> Toutefois, il peut être possible de s'y ramener fictivement par combinaison des variations du facteur solaire et de coefficient de déperdition (l'augmentation de la surface se traduit par une augmentation des apports solaires et des déperditions)

<sup>21</sup> Alors que le comportement du bâtiment, avec l'aération, y est très sensible (voir point 2.1.2 du rendu 1.3) et que leur mise à jour selon les conditions courantes est indispensable (point 1.1.2 du présent rendu).

## Conclusion de l'étude

La présente tâche 5.2 nous a permis de définir une **variante générique du bâtiment LowCal**, permettant de neutraliser la sobriété d'usage et le remplissage partiel des bureaux. Cette variante, décrite au § 1.1 est utilisée par la suite du rapport et également dans les tâches 3 et 4 (ACV et coût global).

La **variante d'usage résidentiel** est basée sur la conception anticipée par l'architecte dès l'APS du projet réel, et mise à jour en fin de DCE. La partie 1.2 en définit également les paramètres d'usage et de modélisation. L'étude de cette variante résidentielle (§ 2.1) nous apprend qu'un petit collectif de 6 logements conçu sur le concept LowCal a des **besoins de chauffage**, très variables selon l'usage (la variabilité d'usage a été simulée avec AMAPOLA), mais qui **restent comparables à la version bureaux**, et en moyenne plutôt inférieurs. Cela dit, la limite du concept de bâtiment « sans chauffage fixe » en logement est plus conditionnée par l'acceptabilité par les occupants, habitués à un moyen de chauffage bien identifié, que par des considérations techniques. Le résultat favorable sur le besoin de chauffage conforte l'intérêt de la démarche de conception Passive, encore renforcée dans le concept LowCal, et rend possible la mise en œuvre de solutions de chauffage low-tech et peu coûteuses, pouvant aller du simple radiateur électrique si les besoins sont quasi-nuls à un simple poêle à bois ou du chauffage par air.

**Sur la variante générique des bureaux**, l'étude de **différents climats actuels et futurs** (scénario A1B de Météonorm en 2070) ont permis d'explorer à la fois le besoin de chauffage et le confort d'été (§ 2.2). Sur le chauffage, si le très faible besoin de chauffage est généralisable au climat de Montélimar et Marseille, et encore plus faible sur un climat 2070, en revanche à Lille ou Strasbourg il n'est pas toujours possible de rester sous la barre de 5 kW.h/m<sup>2</sup> de besoin de chauffage, et ce même en testant des optimisations d'enveloppe et d'inertie renforcés. **En climat froid, le concept « sans chauffage fixe » doit donc être adapté en chauffage low-tech**, sachant que le critère de conception Passif d'un besoin inférieur à 15 kW.h/m<sup>2</sup> reste largement respecté.

Sur le confort d'été, les résultats de calculs montrent que la **stratégie passive de confort d'été permet de limiter l'inconfort à des valeurs acceptables** pour l'ensemble des climats y compris à Marseille, même si la projection en climat de canicule ou en climat de 2070 ne permettent plus de respecter le critère de moins de 50 heures au-dessus de 28°C. L'inconfort cumulé en confort adaptatif reste sous 20 °C.h d'inconfort cumulé pour l'ensemble des climats ce qui semble raisonnable, et pourrait encore être amélioré par des brasseurs d'air. A noter que Strasbourg en 2070 n'est pas à l'abri de l'inconfort d'été, son climat continental devenant à la fois le plus froid en hiver et le plus chaud en été (voir § 2.2.2).

Des abaques sont proposés (§ 2.2.3) pour interpoler les résultats de l'étude à d'autres climats.

Enfin des variantes ont été testées (partie 3) : il est intéressant de noter que **l'augmentation du niveau d'isolation ainsi que l'augmentation de l'inertie sont systématiquement favorables à la réduction du besoin de chauffage et au confort d'été**. L'optimisation de la conception des vitrages est en revanche difficile à généraliser, et reste la clé de la conception de bâtiments sans chauffage fixe et sans climatisation.

## Annexes

### Profil d'utilisation de l'éclairage pour le LowCal

Type de bureau	Individuel		Paysager	
	Hiver	Eté	Hiver	Eté
[0,1[	0%	0%	3%	3%
[1,2[	0%	0%	3%	3%
[2,3[	0%	0%	3%	3%
[3,4[	0%	0%	3%	2%
[4,5[	0%	0%	2%	2%
[5,6[	2%	2%	8%	10%
[6,7[	5%	6%	17%	16%
[7,8[	11%	9%	31%	23%
[8,9[	38%	22%	72%	52%
[9,10[	57%	34%	89%	64%
[10,11[	59%	35%	88%	64%
[11,12[	57%	35%	85%	65%
[12,13[	41%	26%	74%	58%
[13,14[	40%	25%	71%	58%
[14,15[	48%	30%	78%	64%
[15,16[	51%	32%	80%	65%
[16,17[	51%	30%	81%	66%
[17,18[	48%	25%	83%	63%
[18,19[	33%	15%	69%	51%
[19,20[	14%	7%	43%	37%
[20,21[	5%	3%	23%	22%
[21,22[	2%	2%	10%	15%
[22,23[	1%	1%	4%	9%
[23,24[	1%	1%	3%	5%

Figure A.1. Profil d'utilisation de l'éclairage.

## Profil du taux d'occupation pour le LowCal

Créneaux horaire	Taux d'occupation
[0,1[	0%
[1,2[	0%
[2,3[	0%
[3,4[	0%
[4,5[	0%
[5,6[	0%
[6,7[	0%
[7,8[	0%
[8,9[	25%
[9,10[	80%
[10,11[	100%
[11,12[	100%
[12,13[	50%
[13,14[	50%
[14,15[	100%
[15,16[	100%
[16,17[	80%
[17,18[	50%
[18,19[	25%
[19,20[	0%
[20,21[	0%
[21,22[	0%
[22,23[	0%
[23,24[	0%

Figure A.2. Profil du taux d'occupation des bureaux.

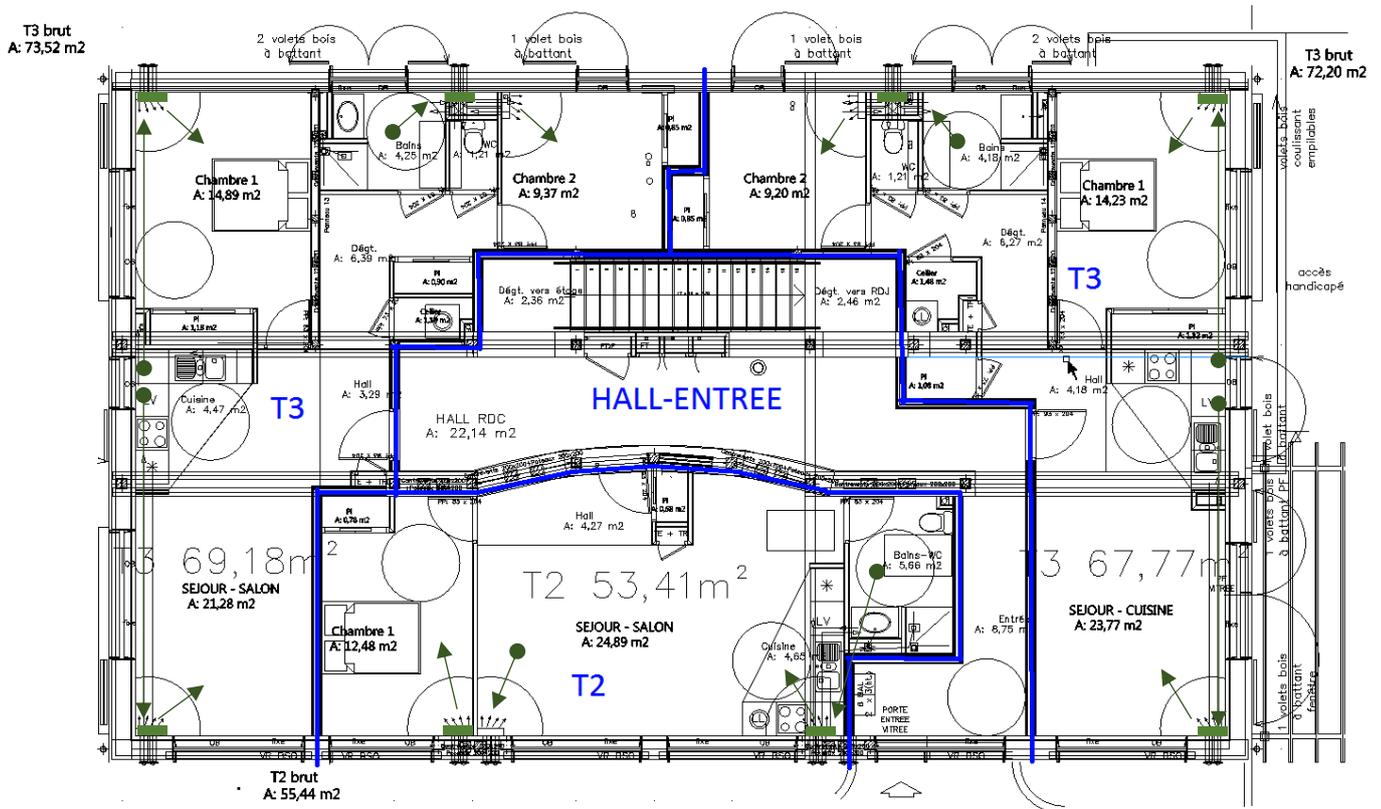
## Occupation des zones pour le LowCal

Zone	Occupation	Période
Z2 Grande Réunion	20 personnes	Exceptionnellement (non étudié)
Z3 Atelier	1 personne	Journée type semaine
Z4 Accueil	1 personne	Journée type semaine
Z6 Réfectoire	15 personnes	De 12h à 14h en semaine
Z7 Réunion	6 personnes	Exceptionnellement (non étudié)
Z8 Visio	3 personnes	Exceptionnellement (non étudié)
Z9 Bureau	4 personnes	Journée type semaine
Z10 Open space	4 personnes	Journée type semaine
Z11 Bureau	3 personnes	Journée type semaine
Z12 Bureau	1 personne	Journée type semaine
Z16 Bureau	10 personnes	Journée type semaine
Z17 Bureau	2 personnes	Journée type semaine
Z18 Open space	4 personnes	Journée type semaine
Z19 Open space	3 personnes	Journée type semaine
Z20 Bureau	1 personne	Journée type semaine

Figure A.3. Occupation des différentes zones.

## Plans du LowCal-résidentiel

Rez-de-Chaussée :



Etage :

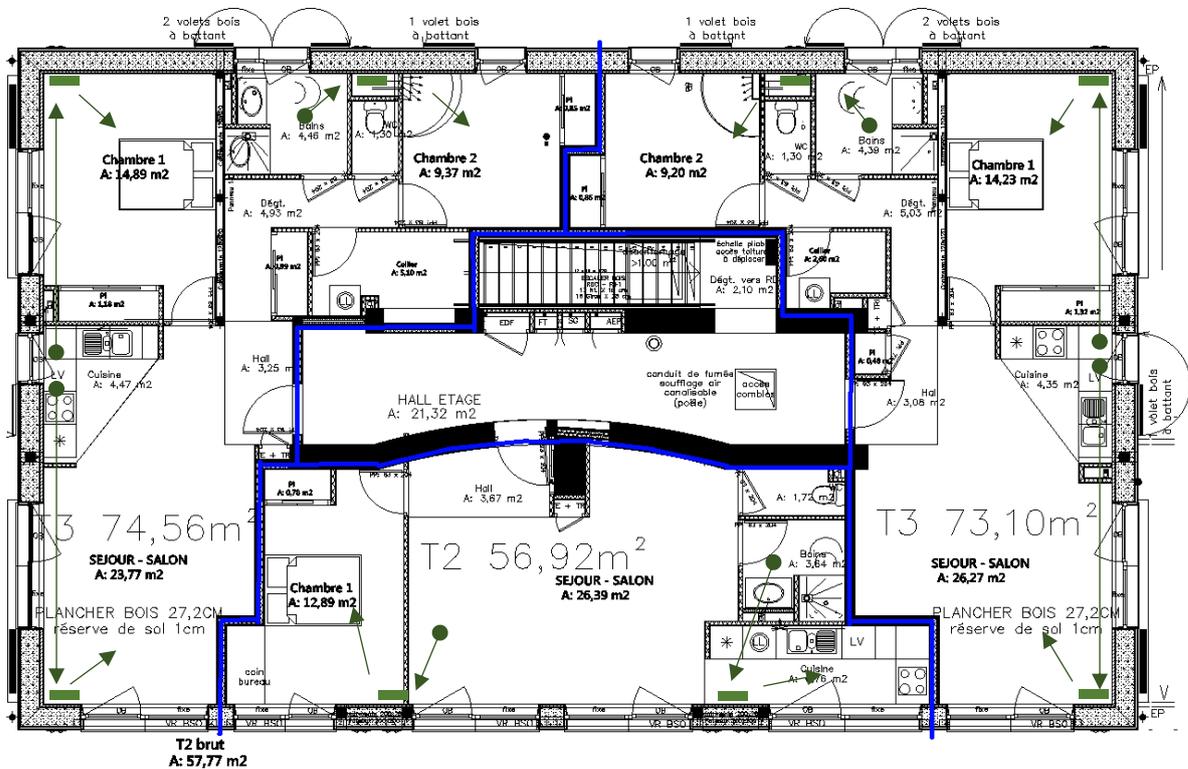


Figure A.4. Plan du LowCal-Résidentiel avec indications de la gestion de la ventilation.

### Estimations lors des périodes critiques

Zone 4 – Accueil	AI (kWh)	AS (kWh)	D (W/K)	I (kWh/K)	Qv (vol/h)	t <sub>aé</sub> (h)
En période caniculaire	1,4	1,0	13,2	1,8	8	2
En période froide	1,7	0,0			0	0

Figure A.5. Données d'entrée pour l'estimation des grandeurs caractérisant le comportement du bâtiment lors des périodes critiques.

**Résultats d'optimisation**

	Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Temps d'inconfort (h)	Inertie	Isolation	Coefficient de déperdition fenêtre				Facteur solaire fenêtre			
					N	S	E	O	N	S	E	O
Montélimar 2070	4,4	47	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	+19%	+19%
	4,4	40	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	+19%	0%
	4,5	36	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	+19%	-14%
	4,5	35	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	0%	-14%
	4,6	34	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	-14%	+19%	0%	-14%
	4,6	30	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	0%	+19%	-14%
	4,7	27	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	-14%	+19%	-14%
Marseille 2070	3,0	74	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	+19%	+19%
	3,0	72	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	-14%	+19%	+19%	+19%
	3,1	60	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	+19%	0%
	3,1	58	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	+19%	-14%

	3,2	55	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	-14%	+19%	+19%	-14%
	3,2	54	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	-14%	+19%	0%	-14%
Strasbourg 2070	2,1	15	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	-14%	+19%	-14%	-14%
	2,2	13	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	-14%	-14%
	2,4	12	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	+24%	0%	0%	0%	+19%	-14%	-14%	-14%
	2,7	9	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	+24%	0%	0%	-14%	-14%	-14%	-14%
Lille 2070	9,2	0	+10 cm de terre crue sur les cloisons internes	+10 cm d'isolant	0%	0%	0%	0%	+19%	+19%	+19%	+19%

Figure A.6 – Résultats des optimisations selon les différents climats.