

A L'OMBRE DU RECHAUFFEMENT

CONCEVOIR UN REFUGE CLIMATIQUE SOUS  
LA CHALEUR IBERIQUE



Tom CIREDDU

Travail de fin d'étude 2024-2025  
LOCI Tournai

## Comment concevoir un refuge climatique au sein du climat chaud d'Andalousie ?

Promotrice : Giulia Scialpi

Experte : Ana Terra Amorim Maia

Tom Cireddu, Travail de fin d'étude, 2024 - 2025

UCLouvain, LOCI Tournai

# REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail de fin d'étude.

Je voudrais en premier lieu remercier Giulia Scialpi pour son implication, sa disponibilité, ses réflexions qui ont permis d'alimenter ce projet.

Ana Terra Amorim-Maia pour son suivi tout au long de cette année et pour m'avoir transmis ses connaissances, notamment sur les refuges climatiques.

Je remercie également l'ensemble des professeurs d'atelier de Master pour leurs conseils judicieux.

Je tiens également à saluer mes amis, Matthieu, Marion et Hugo pour m'avoir épaulé jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Pour conclure, je tiens à remercier ma famille qui m'a toujours soutenu tout au long de mes études.

5	REMERCIEMENT
9	AVANT-PROPOS
11	INTRODUCTION

## **PARTIE 1** LE CLIMAT : IMPACT ET ADAPTATION

<b>13</b>	<b>CHAPITRE 1 EVOLUTION DU CLIMAT</b>
14	A Le changement climatique
20	B Le climat espagnol
24	C L'impact du secteur de la construction sur le climat
<b>21</b>	<b>CHAPITRE 2 REFUGE CLIMATIQUE</b>
32	A Définition
34	B Refuges climatiques existants
42	C Emplacement du projet

## **PARTIE 2** LES ELEMENTS AU SERVICE DES VIVANTS

<b>47</b>	<b>CHAPITRE 3 LE PROJET ARCHITECTURAL</b>
48	A Analyse du site étudié
56	B Elaboration du programme
58	C Intention du refuge climatique
68	D Concept du projet
<b>71</b>	<b>CHAPITRE 4 UNE CONCEPTION LIEE AU CONTEXTE</b>
72	A Description des éléments bioclimatiques mis en place
84	B Système de climatisation et de ventilation naturel
102	C Confort thermique
112	D Confort visuel
<b>119</b>	<b>CHAPITRE 5 UNE CONCEPTION ADAPTABLE ET CIRCULAIRE</b>
120	A Facteurs basés sur le contexte
126	B Facteurs basés sur la conception spatiale et technique

## AVANT-PROPOS

C'est une discussion avec ma grand-mère italienne qui a semé en moi les premières graines de ce mémoire. Elle m'a confié un jour avec son accent napolitain et son air fatigué : « Avec le temps, je ne pouvais plus retourner dans mon village natal parce que je ne supportais plus la chaleur ». À l'époque, je n'ai pas tout de suite compris ce qu'elle voulait dire. Même si je comprenais qu'il est de plus en plus difficile de supporter la chaleur avec l'âge, pour moi, cette dernière évoquait l'été, les vacances, une parenthèse agréable. Ce n'est qu'un peu plus tard, au détour d'un voyage estival en Andalousie, que ses mots ont pris tout leur sens.

A Jaén, j'ai découvert une chaleur qui dépasse le simple inconfort. Une chaleur permanente, étouffante, qui ne laisse pas de répit. J'ai aussi compris que la perception de cette chaleur varie selon notre rapport au lieu : les touristes la tolèrent mieux parce qu'elle est passagère, parce qu'ils s'y sont préparés et qu'ils savent qu'elle prendra fin. Pour eux, elle est presque exotique, synonyme d'un dépaysement ou d'un plaisir qu'ils ne retrouvent pas à la maison. Mais pour les habitants qui vivent et travaillent constamment avec, la chaleur n'est pas qu'un nombre sur un thermomètre. Elle devient une véritable contrainte quotidienne.

Elle s'infiltré partout : dans les murs, dans les corps, dans les habitudes quotidiennes. Elle dicte les rythmes de vie, impose le silence aux rues qui deviennent trop chaudes, ferme les volets des habitations et fait de la simple ombre d'un arbre un refuge duquel on ne veut pas sortir. J'ai vu les places se vider dès la fin de matinée et les rues être désertées l'après-midi. J'ai ressenti, comme les habitants, ce besoin impérieux de protection. Ce n'est pas un simple inconfort passager : c'est une atteinte au bien-être et parfois à la santé pour les plus vulnérables.

À l'aéroport, alors que je quittais Séville, j'ai discuté avec un homme qui y vivait depuis plus de quinze ans. Il m'a dit simplement : « Ici, l'été, on vit à l'ombre. Quand la chaleur arrive, c'est un véritable siège. »

Cette phrase est restée en moi et m'a fait comprendre que l'architecture ne doit pas seulement exister pour bâtir. Elle doit répondre aux enjeux du climat, du corps, aux usages, aux limites du confort.

Ce mémoire est né de cette sensation : l'impression qu'il manque, dans les villes du sud, des espaces capables d'accueillir les habitants lorsque l'air devient un fardeau. Des espaces où l'on peut respirer, se reposer, exister sans subir. Où l'architecture se concilie avec les conditions extrêmes, en harmonie avec le climat plutôt qu'en guerre contre lui. Ce constat m'amène vers une réflexion plus large sur la manière d'habiter le climat. L'objectif est de composer avec lui par l'architecture et non pas de chercher à le dominer par la technologie.

Comme le résume Philippe Rahm dans son ouvrage « Histoire naturelle de l'architecture », le climat n'est pas un décor, mais une matière première de l'architecture. Il est temps de le traiter comme tel.



## INTRODUCTION

Le climat de notre planète n'a jamais été parfaitement stable. Les données scientifiques actuelles témoignent d'un réchauffement climatique global et l'Europe n'échappe pas à cette tendance. Les épisodes caniculaires sont de plus en plus fréquents et touchent des pays comme l'Italie, l'Espagne, la Croatie, etc. Ces périodes de forte chaleur ne sont pas sans conséquence et sont même une véritable menace pour les populations qui y sont exposées. Ils affectent directement la santé publique, en particulier les personnes âgées, les enfants et de manière générale celles qui n'ont pas facilement accès à des environnements frais et sûrs.

Face à cette réalité, le concept de « refuge climatique » émerge dans plusieurs villes qui sont soumises à cette problématique. Ces espaces offrent aux habitants un abri accessible et tempéré lors des vagues de chaleur, surtout en milieu urbain.

Cependant, on ne peut pas dissocier le réchauffement climatique du secteur de la construction. En effet, l'artificialisation majeur des sols contribue à l'augmentation de la chaleur, particulièrement dans les villes. De plus, le domaine de la construction est l'un des plus gros contributeurs des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle globale. L'uniformisation des pratiques architecturales qui sont indépendantes du contexte, l'usage massif de matériaux à forte empreinte carbone et la dépendance à des systèmes techniques énergivores alourdissent considérablement le bilan environnemental du bâti. De surcroît, la logique actuelle de construction-démolition-reconstruction reflète une dynamique de consommateur, allant à l'encontre des impératifs de durabilité.

Ainsi concevoir des refuges climatiques ne doit pas se limiter à créer des îlots de fraîcheur ponctuels mais doit s'inscrire dans une réflexion sur les systèmes de constructions eux-mêmes. Autrement dit, ces refuges climatiques, comme les constructions en général, ne peuvent être considérés comme une solution durable que s'ils s'affranchissent des logiques énergivores et standardisées qui participent au réchauffement global. En ce sens, ils représentent une opportunité de repenser notre manière de concevoir, d'habiter et de se protéger.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique. Il interroge la possibilité de concevoir un refuge climatique dans un climat chaud, sobre en énergie et en cohérence avec son contexte.

Le climat est structuré par de multiples facteurs naturels mais de plus en plus aussi par les activités humaines. Il connaît des transformations perceptibles à différentes échelles qui nous interrogent en profondeur sur notre manière de vivre, de se protéger et de construire.

Avant de se demander comment réagir, il faut comprendre les causes, les manifestations et les conséquences de ces bouleversements climatiques. Ainsi, il convient d'ancrer notre réflexion sur ce qu'est réellement le climat, la manière dont il évolue et les dynamiques globales et locales qui le régissent.

## CHAPITRE 1 EVOLUTION DU CLIMAT

- A Le changement climatique
- B Le climat espagnol
- C L'impact du secteur de la construction sur le climat

# A Le changement climatique

## Planisphère Köppen-Geiger >

Différents climats dans le monde sur la base des données de 1991 à 2021

Source : World Maps of Köppen-Geiger climate classification

A (tropical)	f (forêt tropicale)	B (sec)	h (chaud)	C (tempéré)	a (été chaud)	D (continental)	w (hiver sec)	E (polaire)	T (toundra)
	m (mousson)		k (froid)		b (été très chaud)		f (pas de saison sèche)		F (calotte glaciaire)
	w (savane, hiver sec)				c (hiver froid)		s (été sec)		
	s (savane, été sec)								

Af	BWh	Csa	Cwa	Cfa	ET
Am	BWk	Csb	Cwb	Cfb	EF
Aw et As	BSh	Csc	Cwc	Cfc	
	BSk	Dsa	Dwa	Dfa	
		Dsb	Dwb	Dfb	
		Dsc	Dwc	Dfc	
		Dsd	Dwd	Dfd	

### Climat

« Ensemble des facteurs météorologiques (des variables de surface comme la température, les précipitations et le vent) qui caractérisent un endroit donné, pendant une période donnée. C'est une présentation synthétique du comportement de l'atmosphère au-dessus d'une région donnée, qui s'appuie sur des statistiques à long terme (30 ans). »

GRUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

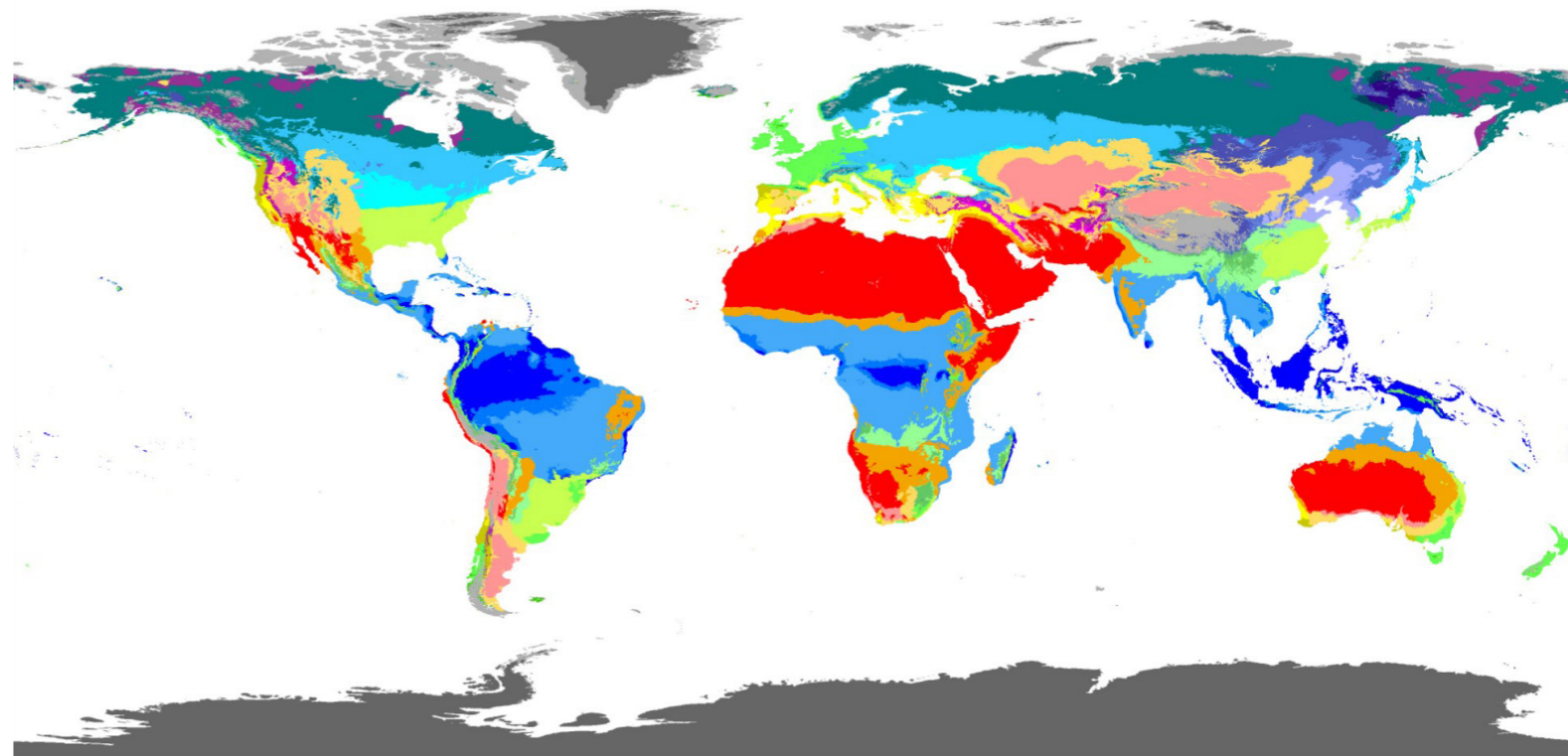
Climat.be

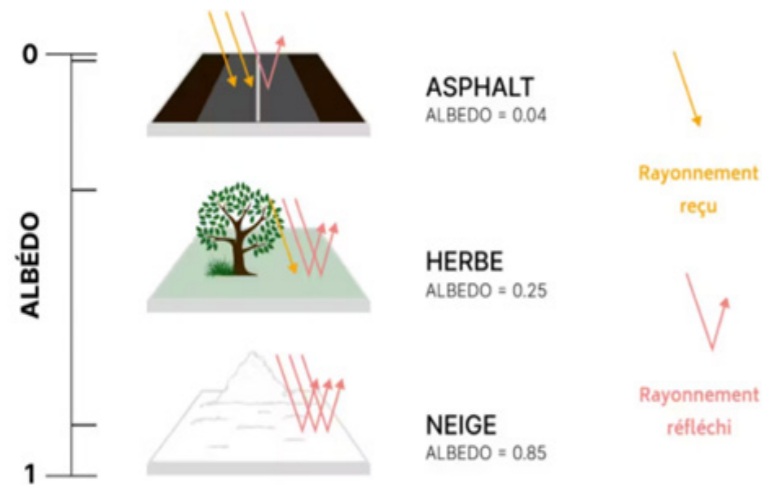
2019

À la différence de la météo, qui décrit les conditions atmosphériques sur une courte durée, le climat s'analyse sur une période minimale de trente ans. Cette période est définie comme la norme, d'après l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale). Ainsi, il est possible d'identifier plusieurs types de climat différents sur la planète, en se basant sur des facteurs climatiques :

- Les courants océaniques qui redistribuent la chaleur en transportant de l'eau plus ou moins froide, ce qui influence l'atmosphère par des échanges d'énergie.
- L'inclinaison de la Terre en fonction de la latitude des régions, a un impact sur la quantité d'énergie reçu par les rayons du soleil.
- Le paysage et la composition du sol influencent le climat en modulant la réflexion des rayons solaires et la capacité de rétention de la chaleur.

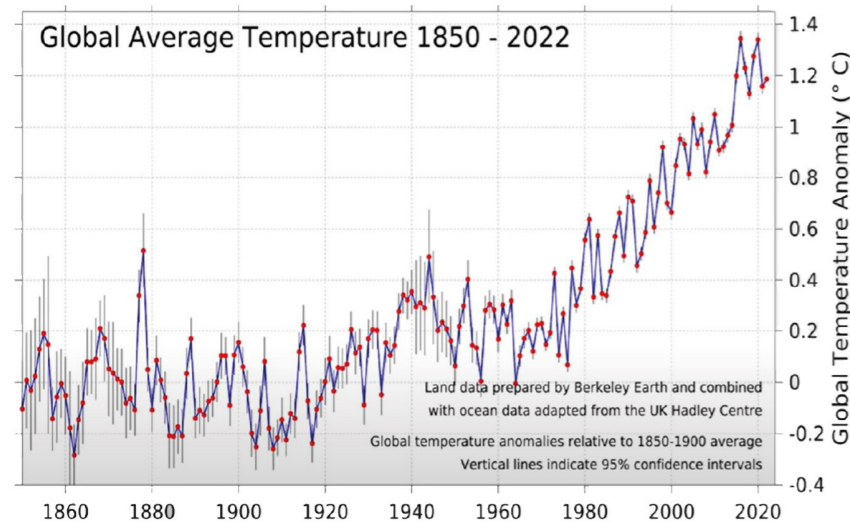
Il est ainsi possible d'illustrer tous les climats présents sur le globe en se basant sur les données climatiques observées. La classification Köppen-Geiger est le résultat du climatologue Wladimir Köppen (1846-1940) et de son collaborateur Rudolf Geiger (1894-1981), qui souhaitait établir un lien entre le climat et la répartition de la végétation naturelle sur terre. Pour se faire, ils ont classé les climats en cinq grands groupes (A, B, C, D et E), chacun avec des sous catégories en se basant principalement sur les température et les saisons de pluie. Depuis le XIXe siècle, la classification s'est modernisée avec des cartes planisphères plus précises qui se basent sur les données actuelles.





#### ◀ Fonctionnement de l'albédo

Source : Greenly.earth, glossaire



#### ◀ Average Temperature 1850 - 2022

Graphique des anomalies moyenne des températures globales de 1850 à 2022 (°C)

Source : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Réchauffement climatique : décriptage d'une arnaque mondiale

Le Raptor, 2024

Évaporation, condensation, nuages et précipitations

S. Elliott, 2020

Le climat dépend de beaucoup de choses. On peut néanmoins déceler des tendances globales de son évolution par la mesure de la moyenne des températures de la surface de la planète. Cette moyenne est un indicateur statistique qui s'avère être très utile pour évaluer des évolutions climatiques, tant sur le passé qu'en projection pour le futur.

On observe sur ce graphique que la moyenne des températures tend à augmenter sur toute la surface de la Terre, ce qui illustre un réchauffement climatique. Cette hausse des températures n'est pas identique dans toutes les régions de la planète. En effet, les terres se réchauffent plus vite que la surface de l'océan, les latitudes élevées et proches des pôles se réchauffent plus vite que les zones équatoriales, et de manière générale, les températures la nuit et en hiver se réchauffent plus vite que les températures plus chaudes. En quelque sorte, le climat s'adoucit.

Pour comprendre pourquoi la Terre se réchauffe, il est important de comprendre comment sa température est régulée. La température est le résultat du rayonnement solaire absorbé par la surface de la Terre. C'est le rayonnement absorbé qui va être la source de chaleur de l'atmosphère. Cependant, une partie de ce rayonnement va être réfléchi par le sol et renvoyée vers l'espace. Ce rayonnement réfléchi est, en retour, considéré comme une source de refroidissement. Le taux de réflexion dépend du type de surface de la Terre, c'est ce qu'on appelle l'albédo.

Il s'agit de la capacité d'une surface à réfléchir la lumière en fonction de sa couleur et de sa matérialité. On le quantifie sur une échelle de 0 à 1. Ainsi, une surface qui ne renverrait pas la lumière qu'elle reçoit aurait un albédo de 0. En revanche, un miroir parfait qui renverrait toute la lumière du soleil aurait un albédo de 1. De cette manière, la surface de la mer a un albédo allant de 0,05 à 0,15, ce qui veut dire qu'elle renvoie 5 à 15 % des rayonnements solaires qui la frappent en direction de l'espace.

### Composition de l'atmosphère

P. Berth, 2018

En moyenne, la Terre renvoie vers l'espace près de 30% du rayonnement solaire incident. C'est là que l'effet de serre intervient. L'atmosphère autour de la planète est composée de différents gaz :

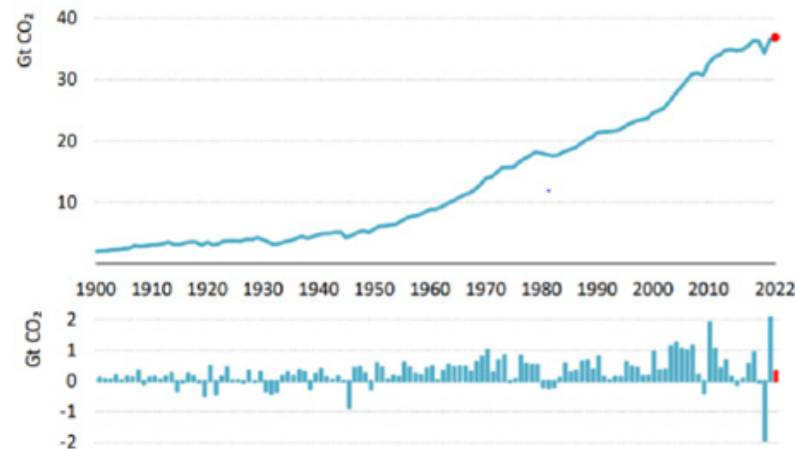
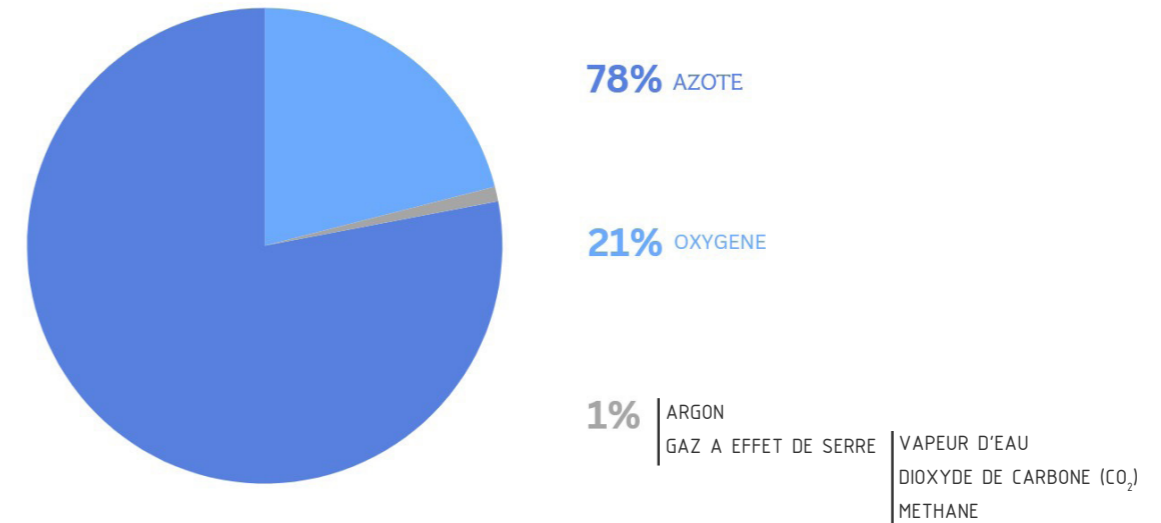
- 78% d'azote
- 21% d'oxygène
- 1% d'autre gaz

Parmi les autres gaz, on trouve les gaz à effet de serre, notamment la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et le méthane. L'effet de serre est un phénomène naturel par lequel une partie de la chaleur émise par la surface de la Terre est retenue dans l'atmosphère, agissant comme un manteau isolant autour de la Terre. Il fonctionne en interceptant le rayonnement infrarouge réémis par la surface et en le renvoyant partiellement vers le sol, ce qui permet de maintenir une température moyenne d'environ 15 °C à la surface de notre planète. Sans ce mécanisme, la température moyenne serait d'environ -18 °C.

### Climat, la part d'incertitude

S. E. Koonin, 2022

La vapeur d'eau est responsable de 90% de l'effet de serre mais sa répartition n'est pas homogène sur la surface du globe. Ainsi, l'effet de serre a un impact plus grand sur certaines régions où la vapeur d'eau est plus présente par rapport à d'autres. Le CO<sub>2</sub>, quant à lui est responsable de 7% de l'effet de serre mais sa répartition est homogène. Les activités humaines ont fortement augmenté la concentration de ces gaz, en particulier celle du CO<sub>2</sub>, accentuant la masse de gaz effet de serre dans l'atmosphère. Les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère renforcent ce phénomène naturel qui est une cause du réchauffement climatique constaté depuis le début de l'ère industrielle.



### Composition de l'atmosphère ▲

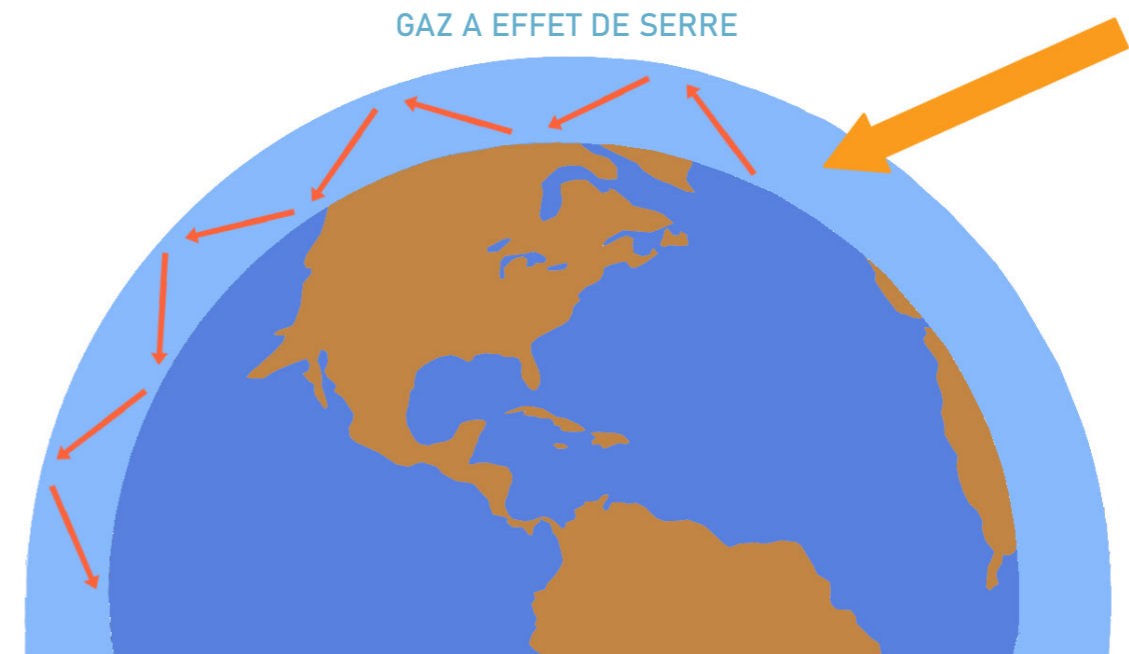
Auteur : Production personnelle

### Effet de serre à la surface de la planète ▶

Auteur : Production personnelle

### ◀ Emissions mondiales de CO<sub>2</sub>

Source : International Energy Agency



# B Le climat espagnol

European Climate and Health Observatory,  
profils par pays,

Climate ADAPT, 2023

L'Europe contient un climat tempéré. La température moyenne durant une année est d'environ 14 °C. Le climat européen est divisé par plusieurs types de climats différents.

On retrouve principalement un climat océanique à l'ouest de l'Europe. Il se caractérise par des précipitations régulières et des températures modérées en hiver et en été, régulées par la présence de l'océan. On retrouve, à l'est, un climat continental caractérisé par des précipitations plus faibles et une amplitude thermique plus marquée (des étés très chauds et des hivers très froids). Le climat du nord de l'Europe est caractérisé par des hivers longs et très froids, des étés courts et frais et des précipitations modérées réparties toute l'année, c'est ce qu'on appelle un climat subarctique. A l'inverse, le sud de l'Europe, quant à lui, est plus chaud. Il est décrit comme un climat méditerranéen où les précipitations ne sont pas fréquentes. L'été y est chaud et sec, et l'hiver doux.

Le climat espagnol se distingue de celui des autres pays européens par sa chaleur plus marquée et son ensoleillement plus important que les autres pays européens. Comme le montre la carte de l'Espagne, il existe une nette rupture entre le climat océanique au nord de l'Espagne et le climat continental, dit des steppes, qui couvre l'intérieur des terres.

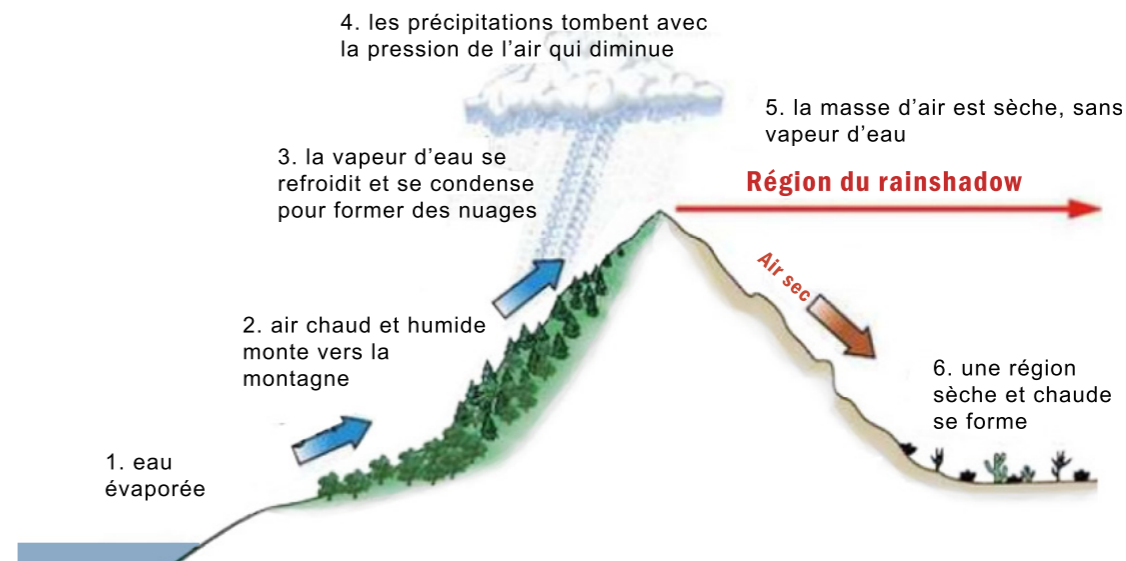
Ce phénomène résulte de la disposition des chaînes de montagnes. Ces dernières limitent l'évaporation et réduisent l'humidité des masses d'air océaniques venant du nord, créant ainsi l'effet « Rainshadow ».

En effet, la partie centrale de l'Espagne est devenue aride car l'air humide du nord, qui prend de l'altitude en traversant les chaînes de montagnes, se refroidit. Cet air frais se dilate et n'est plus capable de retenir l'humidité accumulée au-dessus de l'océan.

Ce phénomène, appelé une dépression, est responsable de précipitations. Lorsque l'air redescend de l'autre côté de la montagne, il se réchauffe mais reste dépourvu d'humidité, ce qui entraîne une formation très limitée de nuages.

L'absence de nébulosité ne permet pas de filtrer les rayons du soleil, entraînant une augmentation des températures et une intensification du taux d'évaporation dans le sol et l'atmosphère.

Par conséquent, certaines régions présentent des climats semi-arides, notamment le sud-est de la péninsule Ibérique et certaines parties de la vallée de l'Èbre. Sous l'influence du changement climatique, ces zones, déjà considérées comme les plus arides et chaudes d'Espagne, s'agrandissent : c'est ce qu'on appelle la désertification.



## ▽ Cartes des reliefs en Espagne

Source : *The distribution of the Genus Buthus in the Iberian peninsula, Inaturalist*

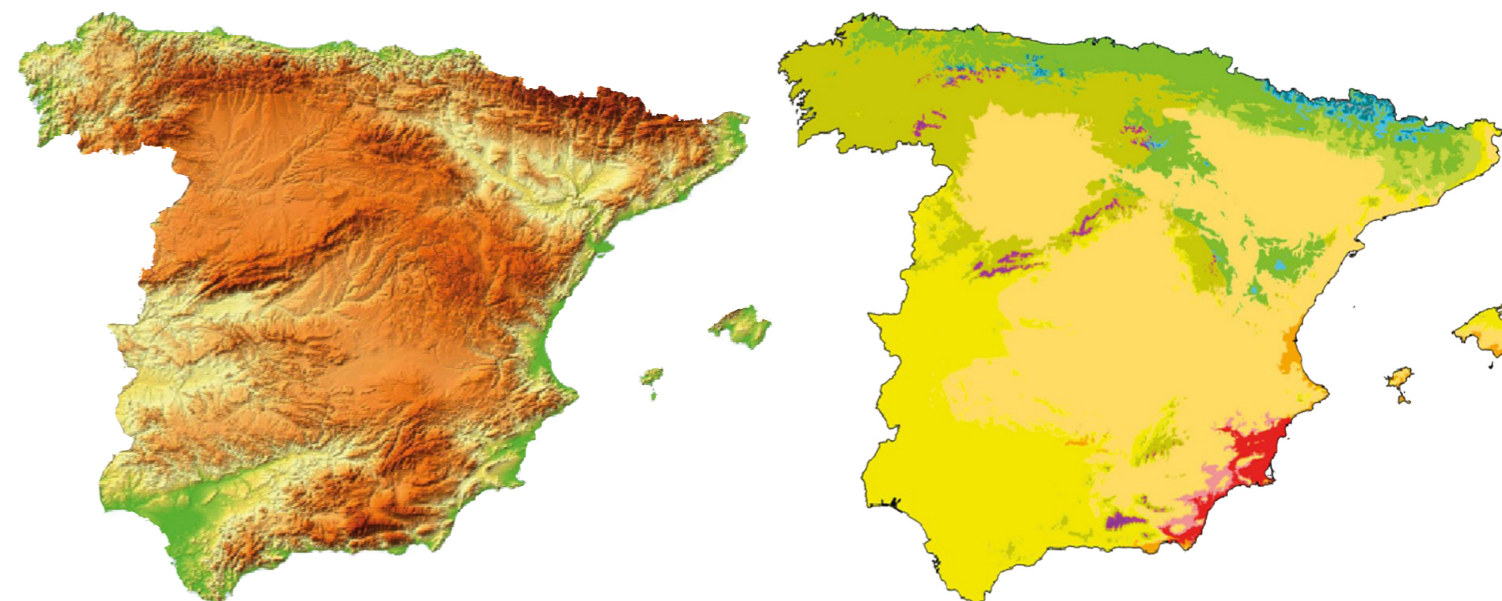
## △ Effet « Rainshadow »

Auteur : *Production personnelle*

## ▽ Carte Köppen-Geiger de l'Espagne

Différents climats dans en Espagne sur la base des données de 1991 à 2021

Source : *World Maps of Köppen-Geiger climate classification*



Rain Shadow

University of Illinois, Extension , 2015

La chaleur et votre santé

Salubrité de l'environnement, Manitoba

## Symptômes liés à la chaleur ▶

*Auteur : Production personnelle*

Ce processus entraîne des montées de température qui posent de nombreux problèmes quant à la vivabilité de ces zones. L'augmentation de la chaleur pose des problèmes de santé à ne pas sous-estimer. En effet, l'exposition prolongée aux fortes chaleurs peut causer différentes complications plus ou moins graves :

- L'hyperthermie provient d'une élévation soudaine de la température du corps (pouvant dépasser 40 °C) qui n'arrive plus à se réguler lui-même. Cela peut entraîner des maux de tête, des confusions, voire une perte de conscience.

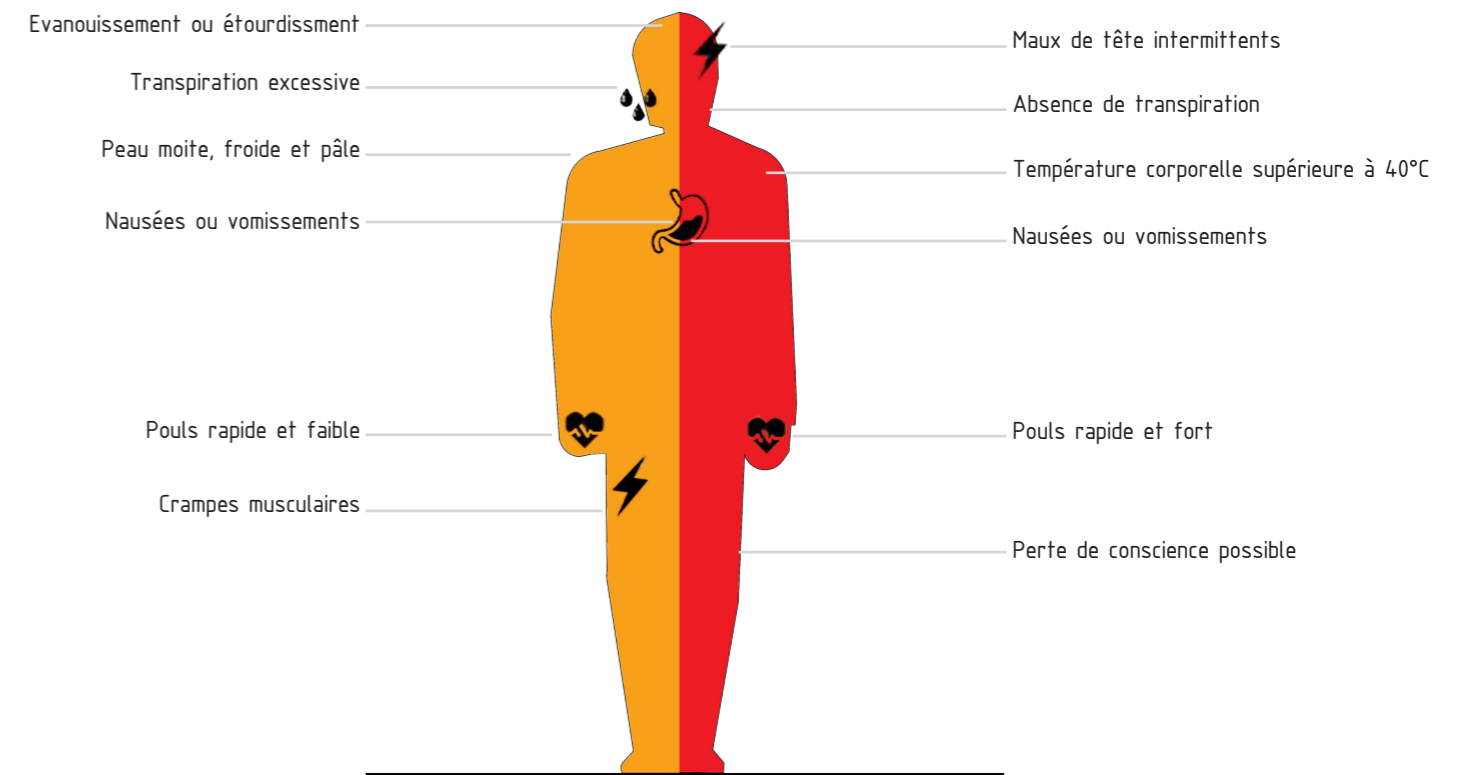
- La déshydratation survient lorsque le corps perd plus d'eau par transpiration sans apport suffisant pour combler la perte, ce qui peut provoquer des vertiges, des maux de tête et des crampes musculaires.

- Des problèmes cardiovasculaires peuvent survenir lorsque le cœur travaille plus vite que la normale de façon à refroidir le corps via la circulation sanguine. Cet effort permanent cause des risques de crise cardiaque ou d'aggravation d'insuffisance cardiaque.

- Des troubles respiratoires et neurologiques peuvent également survenir puisque l'air chaud peut rendre la respiration plus difficile, surtout chez les personnes vulnérables, provoquant une hypoxie à cause du manque d'oxygène dans les tissus.

Ces problèmes liés à la surchauffe sont particulièrement dangereux pour certaines personnes comme les personnes âgées et les jeunes enfants, qui ont une moins bonne régulation de la température corporelle, ainsi que pour les personnes atteintes de maladies chroniques (cardiaques, respiratoires, diabétiques, rénales, etc.). De manière générale, toutes les personnes qui sont exposées à plus ou moins long terme aux fortes chaleurs sont confrontées à ce risque sanitaire.

## EPUISEMENT PAR LA CHALEUR    COUP DE CHALEUR



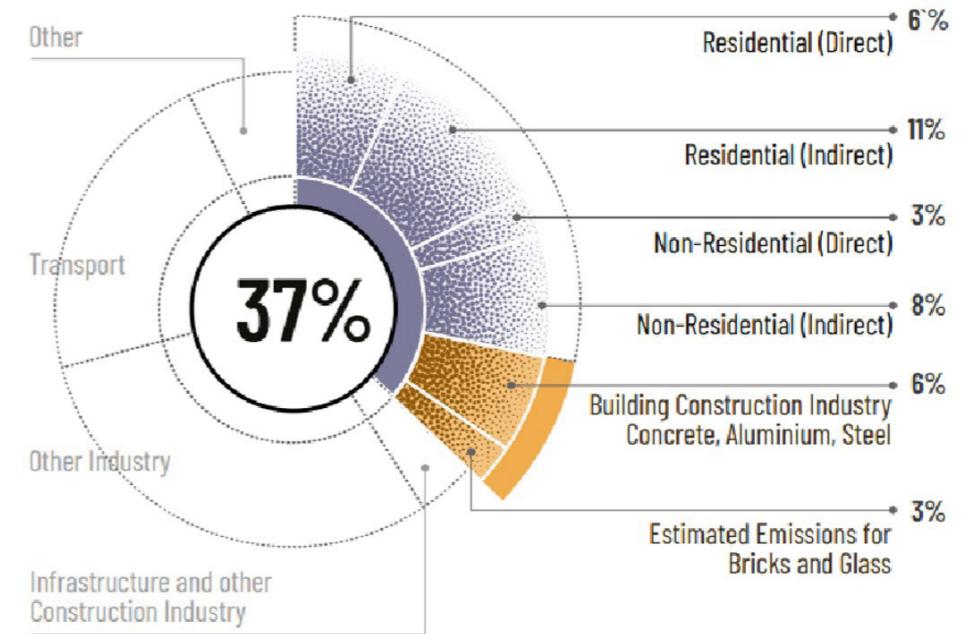
# C Impact du secteur de la construction

## Part mondiale des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde en 2021

Source : UNEP, Building materials and the climate 2022

## Détail de l'empreinte carbone sur la durée de vie d'un bâtiment

Source : UNEP, Building materials and the climate 2022



Building material and the climate  
UNEP, 2022

Le secteur de la construction joue un rôle majeur dans l'augmentation des températures mondiales en raison de ses émissions significatives de gaz à effet de serre. En 2021, le secteur du bâtiment et de la construction a été responsable de 37% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) liées à l'énergie et aux processus industriels, incluant à la fois les émissions opérationnelles et celles incorporées dans les matériaux. Cette contribution place le secteur parmi les plus grands émetteurs mondiaux, aux côtés de l'industrie lourde et des transports.

Les émissions de carbone opérationnel représentent les émissions associées à la consommation d'énergie utilisée durant la phase d'exploitation du bâtiment. Elles peuvent être liées au chauffage, l'éclairage, la climatisation, la ventilation et les appareils électriques utilisés.

Cependant, les émissions de carbone incorporé représentent les émissions qui résultent de la fabrication et de la transformation des matériaux de construction. Cela couvre l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux, leur transport, la mise en œuvre de l'ouvrage dans son ensemble, ainsi que sa démolition en fin de vie.

	WORK OF THE GEO-BIOSPHERE	PRODUCTION	CONSTRUCTION	USE	END-OF-USE
EMBEDDED	Raw Material Management	Extraction	Transport	Repair and Refurbishment	Deconstruction
	Fossil Fuels	Transport	On-site Construction Emissions	Ongoing Maintenance	Re-Use, Recycle, Redesign
	Forest and Agriculture Management	Manufacture		Energy for Heating, Cooling and Ventilation	Incineration
OPERATIONAL		Off-Site Pre-fabrication		Urban-Scale Impacts	Landfill
				Appliance and Plug Loads	

Building materials and the climate  
UNEP, 2022

Toutes ces émissions de CO<sub>2</sub> envoyées dans l'atmosphère jouent donc un rôle important dans le réchauffement climatique. Il est donc essentiel, dès la phase de conception, d'adopter une approche globale couvrant à la fois les émissions opérationnelles et les émissions incorporées afin de réduire l'empreinte carbone totale du projet.

#### Réduction du carbone opérationnel :

L'impact pollution sur le secteur de la construction  
ecobati, 2023

La réduction du carbone opérationnel des bâtiments a été largement améliorée par rapport aux constructions du XXe siècle. En effet, les émissions générées par le chauffage, la climatisation et l'éclairage ont considérablement diminué grâce notamment à la mise en place d'une isolation thermique renforcée, une bonne étanchéité à l'air, des équipements basse consommation et des sources d'énergie renouvelable, si possible produites sur place.

Ces émissions devraient continuer de baisser dans les prochaines décennies grâce aux nouvelles technologies comme les pompes à chaleur ou l'éclairage LED, qui sont beaucoup moins énergivores. Cependant, la réflexion peut être poussée encore plus loin avec l'utilisation de systèmes bioclimatiques. En effet, le concept de l'architecture bioclimatique se définit comme une approche de conception qui intègre les caractéristiques environnementales et climatiques d'un site dans la conception de bâtiments et d'espaces urbains.

La forme suit le climat  
P. Rahm, 2021

Cette approche met l'accent sur l'utilisation judicieuse des ressources naturelles et sur la minimisation des émissions carbone des projets dans le but d'optimiser le confort de l'utilisateur. Le premier principe de l'architecture bioclimatique est son intégration dans l'environnement. Elle prend en compte la direction des vents dominants, le rayonnement solaire incident, les ombrages voisins, la végétation environnante, etc.

La conception du bâtiment se base sur ces éléments en se posant certaines questions : de quoi faut-il se protéger ? De quoi peut-on tirer parti ? Comment trouver un équilibre entre les apports naturels et les risques qu'ils peuvent engendrer ?

Les réponses à ces questions permettent d'optimiser la forme géométrique du bâtiment, son implantation, sa position, ainsi que le type d'ouvertures, l'aménagement intérieur, etc., afin de tirer parti du climat local pour assurer le confort à l'intérieur du bâtiment.

Elle privilégie ainsi les solutions passives, telle que la ventilation naturelle, plutôt que de recourir à des technologies plus avancées, comme la climatisation mécanique, qui offriraient des résultats similaires mais avec une consommation énergétique et des émissions bien plus élevées.

Évaluation de la réduction des émissions de carbone des bâtiments en fin de vie utile fondée sur plusieurs stratégies de recyclage

B. Lei, W. Yang, Y. Yan, Z. Tang,  
W. Dong, 2023

#### Réduction du carbone incorporé :

Les matériaux qui seront utilisés pour la construction d'un bâtiment ont une empreinte carbone très élevée, qui commence dès leur extraction. Certains matériaux nécessitent de gros moyens très énergivores et polluants pendant leur extraction. C'est le cas des minerais comme le fer, qui nécessitent des mines profondes, ou des roches dures qui nécessitent des engins rejetant beaucoup de CO<sub>2</sub>.

En plus de cela, le plus souvent, les matières premières doivent être transformées en usine après l'extraction. Cette transformation en usine peut elle aussi être extrêmement émettrice en CO<sub>2</sub>, comme l'acier qui est produit en chauffant du minerai de fer à l'aide de fourneaux. La chaleur des fourneaux est souvent obtenue en brûlant du charbon, qui est l'un des combustibles fossiles les plus polluants. Les émissions peuvent aussi provenir de réactions chimiques, comme le béton qui est fabriqué à partir de calcaire qui, une fois chauffé, subit une réaction chimique appelée décarbonatation, libérant directement du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

On peut trouver des alternatives moins polluantes en se basant sur des techniques de construction traditionnelles, comme la construction en terre crue. Les murs en pisé, torchis, briques de terre compressée ont une très faible empreinte carbone.

Il existe également des matériaux dits biosourcés, qui ont un carbone neutre ou même négatif. En effet, on considère que certains matériaux comme le bois, initialement extrait d'un arbre, ont un carbone neutre, puisqu'avant d'être coupé, l'arbre a absorbé une certaine quantité de CO<sub>2</sub>. Ainsi, on estime que le matériau a un carbone neutre si la quantité d'absorption pendant sa durée de vie correspond à la quantité de carbone émise pendant le transport, la découpe et la mise en œuvre du matériau.

Si la quantité de carbone absorbée pendant sa durée de vie est plus grande, alors on considère que le matériau a un carbone négatif. Il faut cependant être vigilant à la manière dont est utilisé le bois, car plus il subit de traitements ou de transformations, plus les émissions générées sont importantes. Aujourd'hui, d'autres matériaux biosourcés sont utilisés comme la paille, le liège ou la ouate de cellulose.

De plus, grâce aux moyens de transport modernes, on peut aujourd'hui se faire livrer des matériaux venant de l'autre bout du monde. Même si leur extraction est relativement peu émettrice de CO<sub>2</sub>, leur acheminement, et en particulier le transport routier, génère une pollution atmosphérique et un bilan carbone très élevés. Il est donc important de privilégier les matériaux locaux, extraits et produits à proximité du projet, afin de réduire tous ces coûts, en plus de participer à la conservation du patrimoine de la région.

Fin de cycle d'un bâtiment : quelles stratégies pour quelle empreinte environnementale ?

V. Pianet, OJD, 2023

La mise en œuvre du bâtiment est aussi un facteur qui aggrave la facture d'émissions de CO<sub>2</sub>. Aujourd'hui, on estime, en fonction de plusieurs critères, que la durée de vie d'un bâtiment varie entre 50 et 60 ans.

Ce constat pose un véritable problème auquel nous sommes déjà confrontés.

En effet, nous nous retrouvons aujourd'hui avec une grande quantité de bâtiments construits au XX<sup>ème</sup> siècle qu'il faut rénover, et parfois même remplacer.

Empreinte carbone du BTP en France : petit état des lieux

Vertuoza, 2025

Or, la démolition d'un bâtiment génère des émissions importantes de CO<sub>2</sub>. Ces émissions varient selon la taille, le type de construction et les méthodes employées. On estime que la démolition d'un bâtiment engendre 4,67 kg de CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> de surface.

Il est donc essentiel d'intégrer ces considérations dès la phase de conception, en adoptant des stratégies architecturales favorisant l'adaptabilité et la durabilité.

Cela implique l'utilisation de techniques de construction et de matériaux, ainsi qu'une conception architecturale axée sur la flexibilité des usages, tout en préservant la structure d'origine du bâtiment.

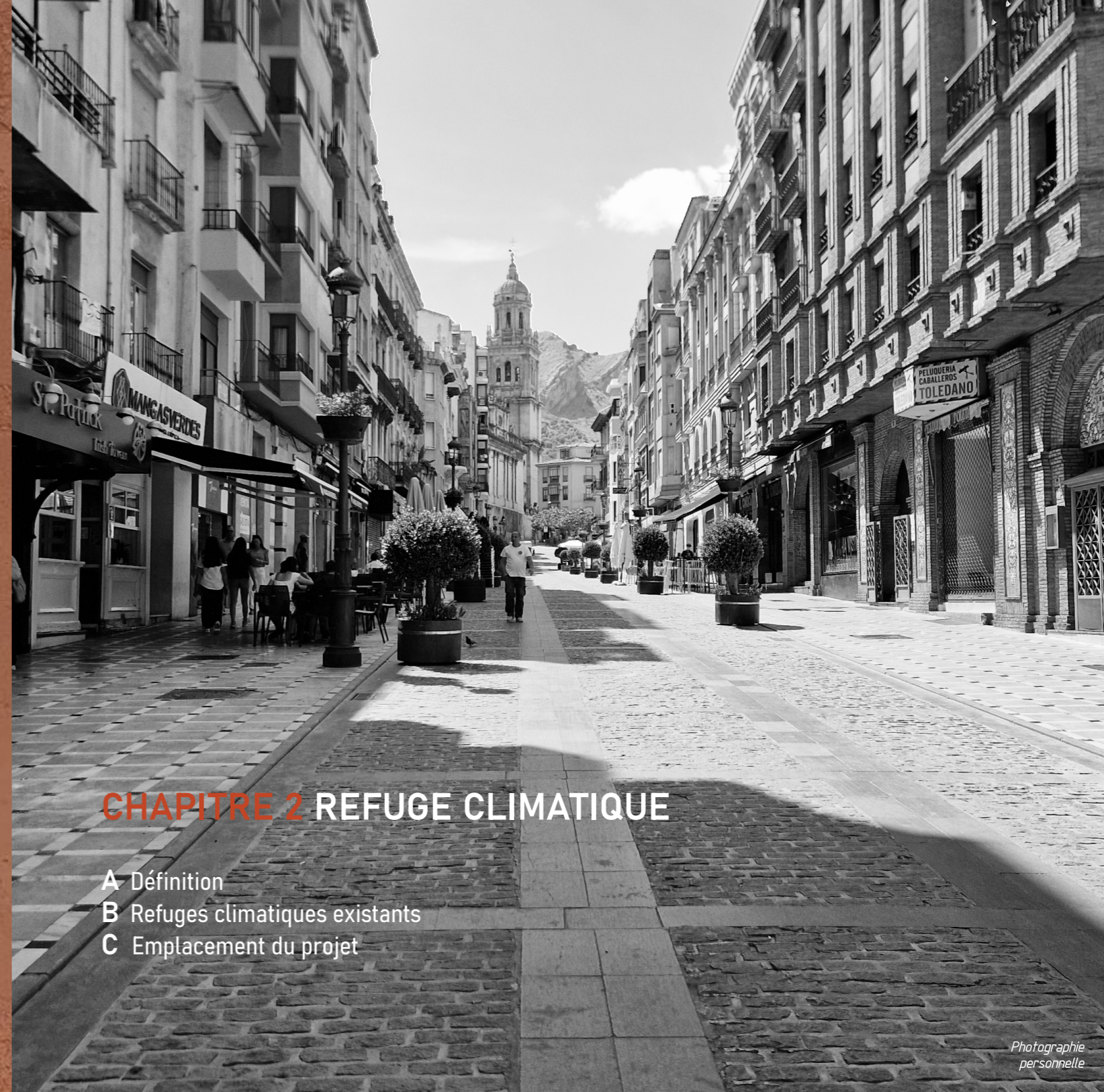
Ainsi, il est possible de concevoir des bâtiments répondant à des besoins spécifiques actuels, tout en permettant leur transformation future pour de nouveaux usages, limitant ainsi les travaux à des modifications mineures des espaces intérieurs.

Les vagues de chaleur deviennent de plus en plus fréquentes et intenses, ce qui représente une menace, surtout en milieu urbain. En ville, ce phénomène est amplifié par l'artificialisation des sols, c'est-à-dire le remplacement des surfaces naturelles (végétation, terre, eau) par des matériaux imperméables comme le béton ou le bitume. Cette transformation accentue l'effet d'îlot de chaleur urbain, un phénomène qui fait grimper les températures plus intensément dans certaines zones de la ville. Il devient essentiel pour celle-ci de développer des stratégies d'adaptation capables de protéger les populations vulnérables et de régler les problèmes de justice sociale.

Selon T. Chakraborty, les températures affectent les quartiers et les résidents de manière différente en fonction des conditions de logement, de la disponibilité des infrastructures vertes et des vulnérabilités socio-économiques liées à certaines inégalités comme le genre, l'origine ethnique, le handicap et le niveau de revenu. Ces inégalités engendrent une réalité dans laquelle le confort thermique est plus difficile à atteindre pour certains que pour d'autres, même au sein d'une même ville.

De plus, selon l'IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), sur 47,5 millions d'habitants, le taux de climatisation en Espagne est estimé à 60 % des logements, et 70 % dans les grandes villes comme Séville, Madrid ou Barcelone. Ainsi, environ 19 millions de personnes en Espagne n'ont pas de climatisation dans leur logement, soit environ 36 % de la population.

Pour répondre à ces difficultés sociales, certaines villes ont commencé à mettre en place des solutions concrètes.



## CHAPITRE 2 REFUGE CLIMATIQUE

- A Définition
- B Refuges climatiques existants
- C Emplacement du projet

# A Définition

## Réseau des abris climatiques

Barcelone pour le climat, Ajuntament de Barcelona

Un refuge climatique est un espace naturel ou urbain, conçu pour offrir des conditions environnementales favorables permettant de se protéger des épisodes météorologiques défavorables, comme les vagues de chaleur.

## Climat

« Les refuges climatiques sont des infrastructures urbaines essentielles qui soutiennent l'adaptation au changement climatique et offrent des espaces publics de refuge en cas de températures extrêmes. »

### CHERCHER REFUGE : LES ABRIS CLIMATIQUES PEUVENT-ILS RÉPONDRE AUX VULNÉRABILITÉS INTERSECTIONNELLES

A. T. Amorim Maia, I. Angelovski, J. Connolly, E. Ch  
2023

## Les refuges climatiques accueillants de Barcelone

K. Seruga, 2025

Les refuges climatiques ont été inventés à Barcelone en 2019 en s'inspirant des « cooling centres », notamment aux États-Unis et en Australie. Il s'agit d'espaces publics situés dans des infrastructures existantes qui ont été adaptés pour assurer un certain confort thermique pendant les périodes de forte chaleur.

Les refuges sont des espaces préexistants qui ont été réaménagés en « abris » tout en continuant de remplir leurs fonctions d'origine.

Le type de lieu peut varier d'un quartier à un autre. Il peut s'agir d'un parc, d'un centre civique, d'un musée, d'une école ou d'une bibliothèque, pourvu que le bâtiment soit accessible au public pendant les épisodes caniculaires. Par exemple, une bibliothèque reste une bibliothèque, mais elle dispose également d'espaces capables d'accueillir les habitants qui cherchent à se protéger de la chaleur. Pour être considérées comme des refuges climatiques, ces infrastructures publiques doivent remplir certaines conditions.

Dans la ville de Barcelone, l'espace d'accueil doit garantir une température inférieure à 26°C, proposer un accès à de l'eau et à des toilettes ainsi que des endroits où s'asseoir. Si un refuge climatique est en extérieur, comme un parc, il doit nécessairement offrir des espaces ombragés et des fontaines à eau fonctionnelles.

## Seeking refuge? The potential of urban climate shelters to address intersecting vulnerabilities

Ana T. Amorim-Maia, I. Anguelovski, J. Connolly, E. Chu, 2022

Un refuge climatique doit nécessairement rester ouvert pendant les mois les plus chauds de l'année. De nombreux équipements publics réduisent leurs horaires d'ouverture au public pendant l'été, ce qui n'est aucunement compatible avec leur fonction de refuge climatique. En plus de cela, il est primordial que le refuge climatique soit un espace accessible gratuitement ou à moindre coût pour profiter à toute la population, même défavorisée. Ces refuges incluent des espaces verts ainsi que des installations intérieures climatisées, comme des centres d'urgence qui pourraient également offrir un abri lors d'épisodes de tempêtes, d'inondations ou d'incendies.

## Centre de la culture contemporaine, Barcelone

Source : Mairie de Barcelone

Avec l'intensification des impacts climatiques, les refuges climatiques se sont démocratisés dans plusieurs villes à travers le monde. Pour rester efficaces, chaque ville doit définir sa propre définition d'un refuge climatique pour créer des espaces d'accueil en cohérence avec sa culture, son climat, son contexte, ses besoins, etc.



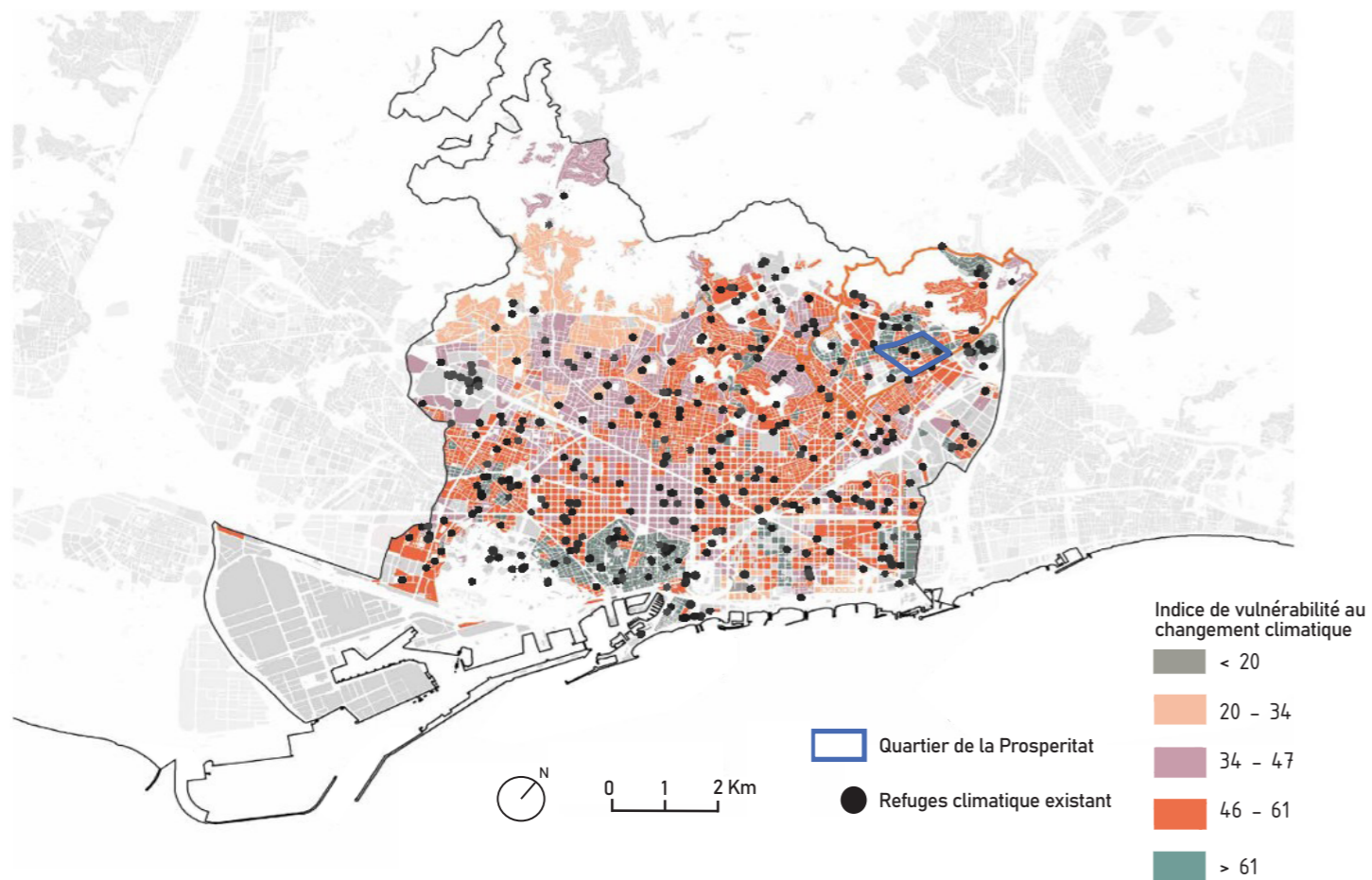
## B Les refuges climatiques existants

### Réseau des abris climatiques

Barcelone pour le climat, Ajuntament de Barcelona

Barcelone est la ville pionnière de cette stratégie de refuge climatique. En 2019, elle a lancé un plan pilote pour adapter 197 espaces d'accueil répartis sur tout son territoire.

Aujourd'hui la ville en compte 396. L'objectif est que 100 % de la population ait un refuge climatique à 5 minutes à pied de chez elle d'ici 2030. La ville estime que le rayon d'impact des refuges climatiques est de 300 à 500 mètres, une distance jugée accessible à pied pour que les habitants puissent s'y rendre facilement.



Tous les habitants de la ville ne sont pas exposés de la même manière aux effets de la chaleur. Certains en subissent plus les conséquences en raison de plusieurs facteurs sociaux et environnementaux comme la qualité des logements, le niveau de pollution de l'air, la proximité avec l'eau ou des espaces verts et l'artificialisation des sols, qui peuvent créer des îlots de chaleur urbains.

### Îlot de chaleur

« L'îlot de chaleur urbain (ICU) est en premier lieu un phénomène physique d'effet de dôme thermique créant une sorte de microclimat urbain au sein duquel les températures sont significativement plus élevées. [...] Des observations ont démontré que les températures des centres urbains sont en moyenne supérieures de 4°C et peuvent atteindre jusqu'à 12°C de plus que les territoires limitrophes. »

« QU'EST CE QU'UN ÎLOT DE CHALEUR ? »

Agence d'Urbanisme de la Région Nantaise

2021

### Indice de vulnérabilité au changement climatique dans Barcelone

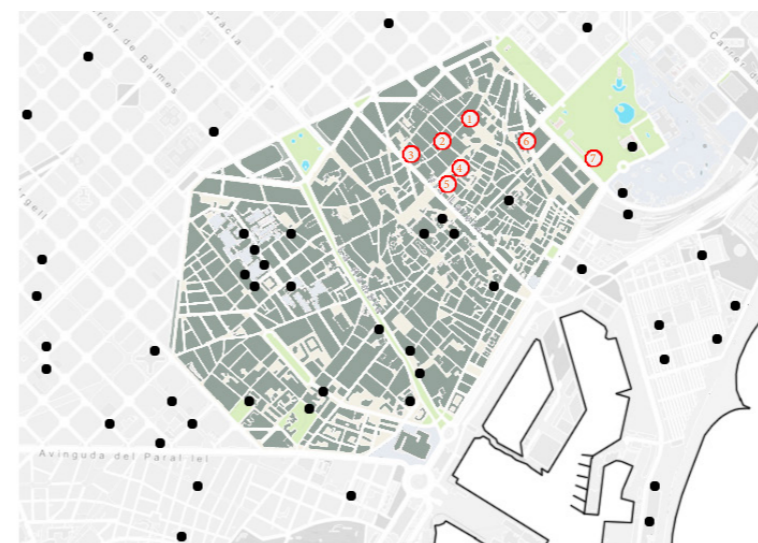
Source : Garcia-Sierra y Domene, 2022

### Emplacement des refuges climatiques dans la Ciutat Vella

Source : Ajuntament de Barcelona

Comme on le voit sur la carte de vulnérabilité, les zones plus denses comme celle de la vieille ville sont également plus exposées à la chaleur.

Le quartier de Ciutat Vella, à l'ouest de la vieille ville, est un quartier très fréquenté et densément peuplé. Pour permettre aux habitants du quartier de se protéger, la ville a mis en place des refuges climatiques en adaptant plusieurs équipements existants. Ces refuges sont implantés dans différents lieux publics du quartier, tels que le marché de Santa Caterina, l'école Cervantes, le parc de la Ciutadella, l'espace jeunesse Palau Alòs, le centre civique Couvent de Sant Agusti, la bibliothèque Francesca Bonnemaison et le musée d'Història de Barcelona.



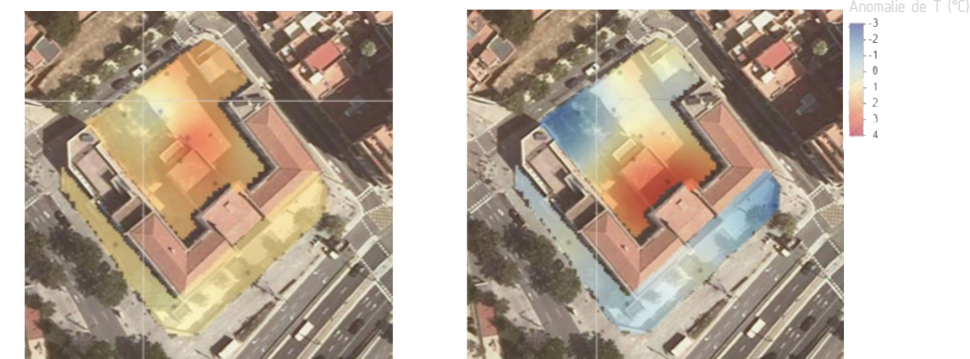
L'aménagement des équipements publics en refuges climatiques se fait au cas par cas, en tenant compte de la fonction du bâtiment. Par exemple, un refuge climatique installé dans une école ne sera accessible qu'en dehors des horaires scolaires, notamment pendant les week-ends ou les vacances. De manière différente, dans un musée comme l'Etnològic i de Cultures del Món, si l'exposition n'est pas gratuite, un zonage peut être mis en place. Ainsi, seule une partie du bâtiment est désignée comme refuge climatique. Cela peut être le hall, la cafétéria ou une salle polyvalente. Les espaces d'exposition restent, quant à eux, accessibles avec un billet comme en temps normal.

La diversité de ces refuges dans un quartier offre à la population une certaine liberté de choix en fonction de leurs besoins. Toutefois, il est difficile d'évaluer si la fréquentation de ces espaces d'accueil est liée au refuge climatique ou à leur fonction première. Quoi qu'il en soit, de nombreux usagers qui se rendent au marché de Santa Caterina, par exemple, profitent également de la fraîcheur, des points d'eau et des espaces de repos. Selon Equinox, un site d'information local, les aménagements d'espaces d'accueil sont toujours très appréciés et fréquentés par la population.

### Stratégie Blue/Green/Grey appliquée à l'école Rius i Taulet

Evaluation, an indispensable component of innovation projects

Source : UUIA - Urban Innovative Actions, 2020



La municipalité promeut de plus en plus l'adaptation des écoles en refuges climatiques. L'école Cervantes est un exemple représentatif. Elle ouvre ses portes au public pendant les vacances estivales, en particulier aux familles avec des enfants. À cette occasion, la cour et certaines salles intérieures sont aménagées pour accueillir les habitants. Comme c'est le cas de onze autres écoles dans la ville, elle participe à un programme de recherche visant à adapter les espaces scolaires en refuges climatiques selon la stratégie dite « bleu-vert-gris ». Cette approche repose sur trois solutions d'adaptation de l'espace :

- Bleu : installation de points d'eau comme des fontaines et des brumisateurs pour rafraîchir l'environnement.
- Vert : végétalisation pour la création de jardins et la plantation d'arbres dans le but d'offrir de l'ombre et améliorer la qualité de l'air.
- Gris : Aménagement des bâtiments, rénovation thermique, création d'ombrage et d'espaces frais.

Cependant, des limites importantes en termes d'accessibilité aux refuges sont observables. Bien que certains refuges climatiques comme le centre civique Couvent de Sant Agustí ou l'espace jeunesse Palau Alòs soient ouverts toute l'année, ils ferment paradoxalement pendant le mois d'août, l'un des mois les plus chauds de l'année. D'autres refuges, tels que le marché de Santa Caterina ou la bibliothèque Francesca Bonnemaison, ne sont ouverts que certains jours de la semaine, ce qui limite leur utilité en cas d'épisodes de forte chaleur. À l'inverse, des espaces comme le parc de la Ciutadella, qui ne requièrent pas de personnel pour leur fonctionnement, sont ouverts tous les jours de l'année.

Cette variabilité d'ouverture souligne la nécessité d'avoir plusieurs refuges à proximité de son domicile. Cela permet, en cas de fermeture de l'un, d'avoir accès à un autre refuge et ainsi de se protéger efficacement des pics de chaleur.

Ainsi, onze écoles de la ville ont été aménagées dans ce sens et les résultats sont significatifs. L'évaluation du programme a mis en évidence une amélioration des conditions thermiques dans les bâtiments et dans les cours, une meilleure qualité de l'air et un accroissement du bien-être des élèves et du personnel. Ces écoles ont joué le rôle d'expérimentation du programme d'aménagement bleu-vert-gris et sont maintenant prises comme modèles pour aménager les autres refuges climatiques de la ville lorsque c'est possible.

Toutefois, la disposition des refuges climatiques dans la ville soulève d'autres questionnements. La distribution spatiale des refuges climatiques à l'échelle de la ville est inégalitaire.

En effet, certains quartiers excentrés ne disposent pas d'un nombre suffisant d'équipements publics susceptibles d'être adaptés en refuges climatiques. Cette situation est aggravée par d'autres facteurs sociaux, notamment la précarité économique qui contraint les habitants à plus faibles revenus à vivre dans des logements anciens, peu isolés thermiquement et situés à l'écart de la vie urbaine. De plus, ces inégalités touchent de manière disproportionnée les femmes, les personnes âgées et les immigrants issus des pays du Sud. Ces inégalités croisées sont appelées inégalités intersectionnelles.

### Intersectionnalité

« L'intersectionnalité est un concept issu de la sociologie qui désigne la situation de personnes subissant simultanément plusieurs formes de domination ou de discrimination qui s'entrecroisent, se recoupent et s'intensifient mutuellement. »

L'INTERSECTIONNALITÉ : UNE APPROCHE POUR COMPRENDRE LES DISCRIMINATIONS MULTIPLES

OXFAM France

2025

[Seeking refuge? The potential of urban climate shelters to address intersecting vulnerabilities](#)

Ana T. Amorim-Maia, I. Anguelovski, J. Connolly, E. Chu, 2022

C'est le cas des habitants qui vivent dans le quartier de la Prosperitat, étudié dans le cadre de l'étude « Seeking Refuge? ». On comprend à travers cette étude que les refuges climatiques, tels qu'ils sont actuellement conçus, posent des problèmes d'accessibilité et ne sont pas adaptés aux besoins des populations les plus vulnérables.

« L'attribution inégale des abris climatiques et des schémas d'utilisation selon les secteurs sociaux suggèrent que ces espaces ne sont pas suffisamment accessibles et accueillants pour les groupes confrontés à des vulnérabilités intersectionnelles. »

[Seeking refuge? The potential of urban climate shelters to address intersecting vulnerabilities](#)

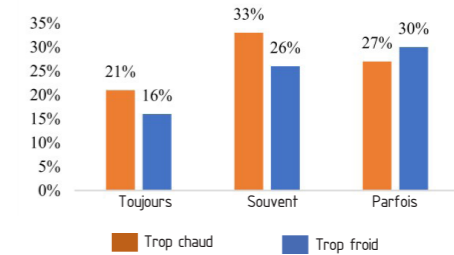
A. T. Amorim-Maia, I. Anguelovski, J. Connolly, E. Chu, 2022

### Inconfort ressentie et refuges accessibles

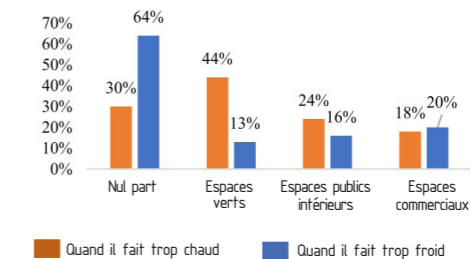
Fréquence des (in)conforts thermiques ressentis à domicile en raison de chaleurs et de froids extrêmes, et espaces de refuge utilisés pour se protéger de la chaleur et du froid extrême.

Source : Seeking refuge?, A. T. Amorim-Maia, I. Anguelovski, J. Connolly, E. Chu, 2022

Inconfort thermique à la maison



Espace de refuge



En effet, il y en a très peu dans ce quartier pourtant densément peuplé et historiquement marginalisé. Les habitants sont donc obligés de se déplacer vers d'autres quartiers lorsqu'ils sont ouverts. De plus, 85 % de ces habitants n'avaient même pas connaissance (en 2023) du réseau de refuges climatiques mis en place par la mairie, ce qui témoigne d'un problème de communication dans les quartiers défavorisés.

Les habitants à faibles revenus et originaires des pays du Sud se sentent confrontés à des barrières socioéconomiques et culturelles qui limitent leur fréquentation des refuges climatiques. Ce recul s'explique par un sentiment d'exclusion culturelle et par l'absence d'espaces extérieurs adaptés.

Les refuges climatiques actuels ne remplissent donc pas pleinement leur rôle social et protecteur sur l'ensemble de la population de Barcelone. Même si ces espaces sont une réelle innovation et une avancée majeure dans le contexte climatique des grandes villes espagnoles, ils devraient s'intégrer dans la vie quotidienne du quartier et ne pas se limiter à des infrastructures techniques.

La justice climatique imposerait une distribution équitable des infrastructures climatiques sur l'ensemble du territoire et en particulier dans les quartiers défavorisés, ainsi qu'une intégration des besoins sociaux et des envies des habitants dans la conception des refuges.

Création inclusive et efficace des refuges climatiques

A.T. Amorim Maia, Barcelona Lab for Urban Environmental Justice and sustainability, 2023

Pour imaginer le refuge climatique idéal, il faut bien saisir les enjeux et les besoins des habitants concernés. Ana Terra Amorim-Maia, chercheuse postdoctorale à *IMAGINE Adaptation*, travaille sur les thèmes de la justice climatique, adaptation urbaine, politique environnementale et refuges climatiques dans le but d'aider les villes à s'adapter au changement climatique du manière inclusive.

Elle est allée à la rencontre de 380 habitants du quartier de La Prosperitat à Barcelone pour recueillir leurs expériences, leurs besoins et leur perception sur le changement climatique ainsi que les caractéristiques de leur refuge climatique idéal.

« L'étude a utilisé une approche intersectionnelle afin de mieux comprendre les dynamiques sociales complexes et de donner la parole aux voix marginalisées dans l'analyse de leurs vulnérabilités face aux changements climatiques. [...] Les recommandations présentées dans ce document proposent des mesures concrètes pour guider les décideurs, les représentants locaux et les techniciens dans la création des abris climatiques qui servent et soutiennent tous les résidents, en particulier ceux qui en ont le plus besoin. »

CREATION INCLUSIF ET EFFICACE DES REFUGES CLIMATIQUES

A. T. Amorim Maia, BCNUEJ – Barcelona Lab for Urban Environmental Justice and sustainability, 2023

Chercher refuge ? Le potentiel des abris climatiques urbains pour répondre aux vulnérabilités croisées

A.T. Amorim Maia, I. Anguelovski, J. Connolly, E. Chu

Landscape and Urban Plannig, 2023

Cette enquête met en évidence que les personnes vulnérables, immigrantes et à faibles revenus subissent des impacts disproportionnés des épisodes caniculaires par rapport au reste de la population. Même si ces habitants sont préoccupés par le réchauffement climatique, l'accès à l'information sur les programmes de lutte contre la chaleur extrême est insuffisant et peu de personnes sont au courant des installations mises en place.

Sur base des habitants interrogés, l'étude propose plusieurs recommandations quant au refuge climatique idéal. De manière générale, il est important que le refuge soit stratégiquement distribué pour être accessible aux personnes qui se trouvent dans des zones vulnérables. Ces espaces peuvent être des lieux dédiés à des services auxquels les habitants n'ont pas forcément accès, comme la culture, l'éducation ou la santé. Il est recommandé de concevoir les refuges climatiques comme des espaces ouverts et intégrés à la nature. Ils doivent également être multifonctionnels, en répondant aux besoins locaux qui peuvent être récréatifs, culturels ou liés à des activités sociales. Cela renforce la communauté et favorise la cohésion sociale.

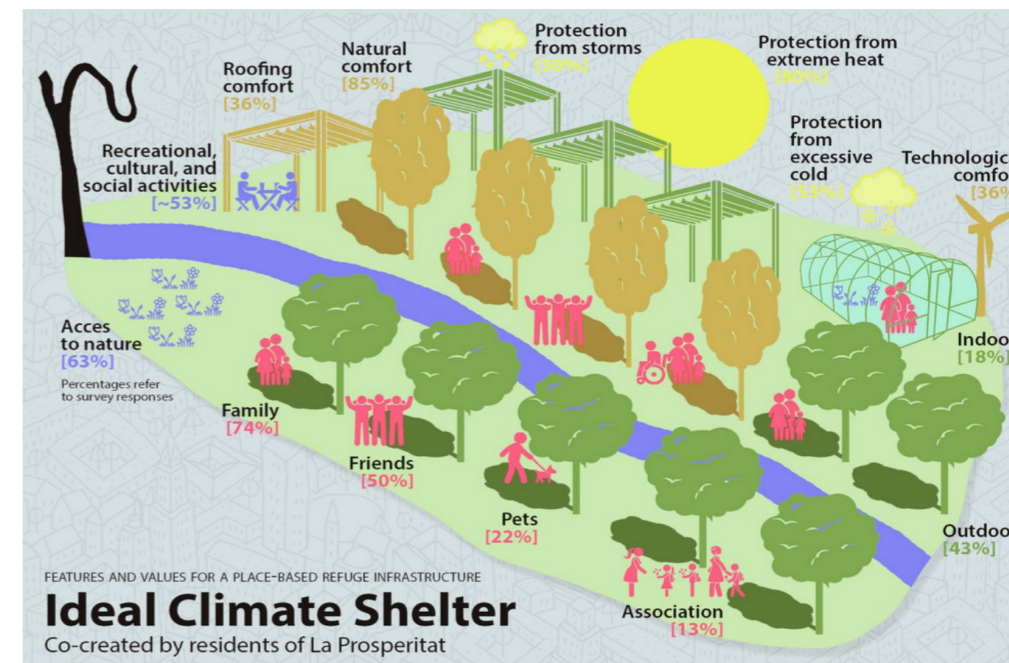
La population doit avoir un accès facilité à la culture, à des activités organisées, des ateliers et des espaces de repos ou de liberté, où chacun peut faire ce qu'il souhaite selon ses besoins. Il est donc essentiel de proposer une diversité d'espaces, à différents degrés d'intimité. Il s'agit de créer un environnement où chacun peut trouver sa place.

Refuge climatique idéal ▶

Représentation des besoins des citoyens de La Prosperitat

Source : *Création inclusive et efficace des refuges climatiques*

A.T. Amorim Maia, BNUEJ – Barcelona Urban, 2023

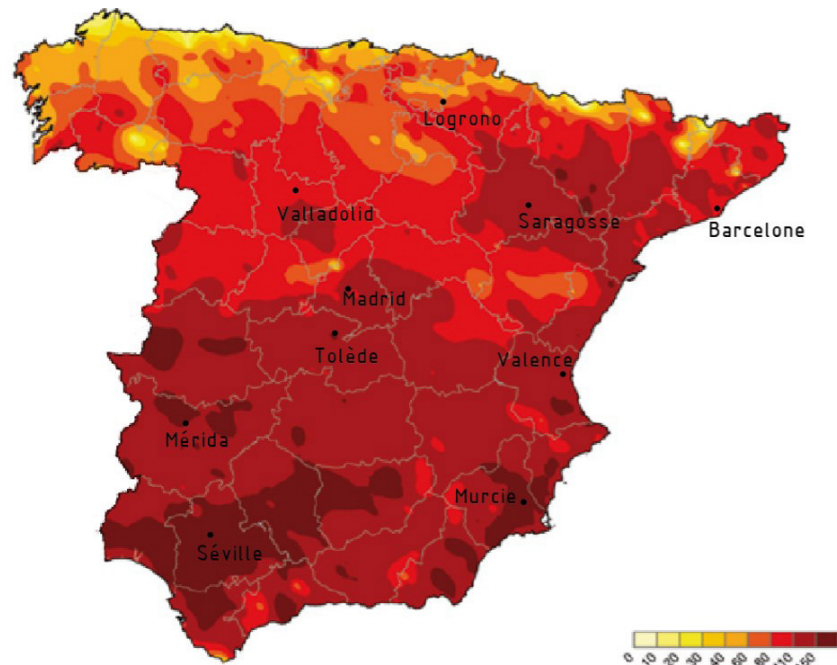
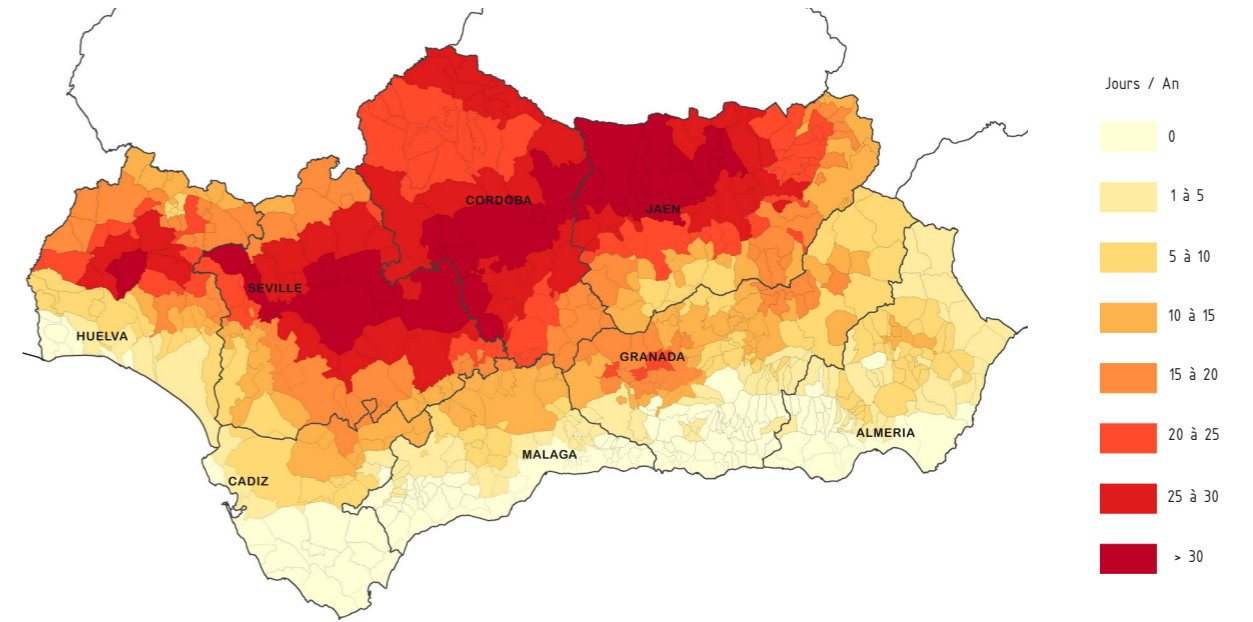


## C Emplacement du projet

Le sud de l'Espagne est la région la plus touchée par les fortes chaleurs. L'Andalousie est l'une des régions les plus affectées par les vagues de chaleur prolongées, dont certaines causent des pics extrêmes pouvant dépasser 45 °C dans les îlots de chaleur urbains.

Comme on le voit sur la carte ci-dessus, la moyenne du nombre de jours dépassant 25°C est largement supérieure dans le sud que dans le nord avec plus de 150 jours par an. En plus de cela, on constate un manque d'équité sur le territoire espagnol en ce qui concerne le développement de refuges climatiques. En effet, on observe que des villes comme Barcelone ou Madrid développent des refuges, tandis que les villes du sud comme Séville, Murcie, Cordoue ou Jaén sont en retard en la matière. Installer des refuges dans cette région contribuerait à réduire les inégalités territoriales face aux effets du réchauffement climatique.

Pour déterminer quelle zone a le plus besoin d'un refuge climatique, il convient d'analyser où la population souffre le plus des fortes chaleurs, en tenant compte de la densité démographique, afin d'identifier les secteurs les plus peuplés.



Moyenne du nombre de jours supérieurs à 35°C en Andalousie

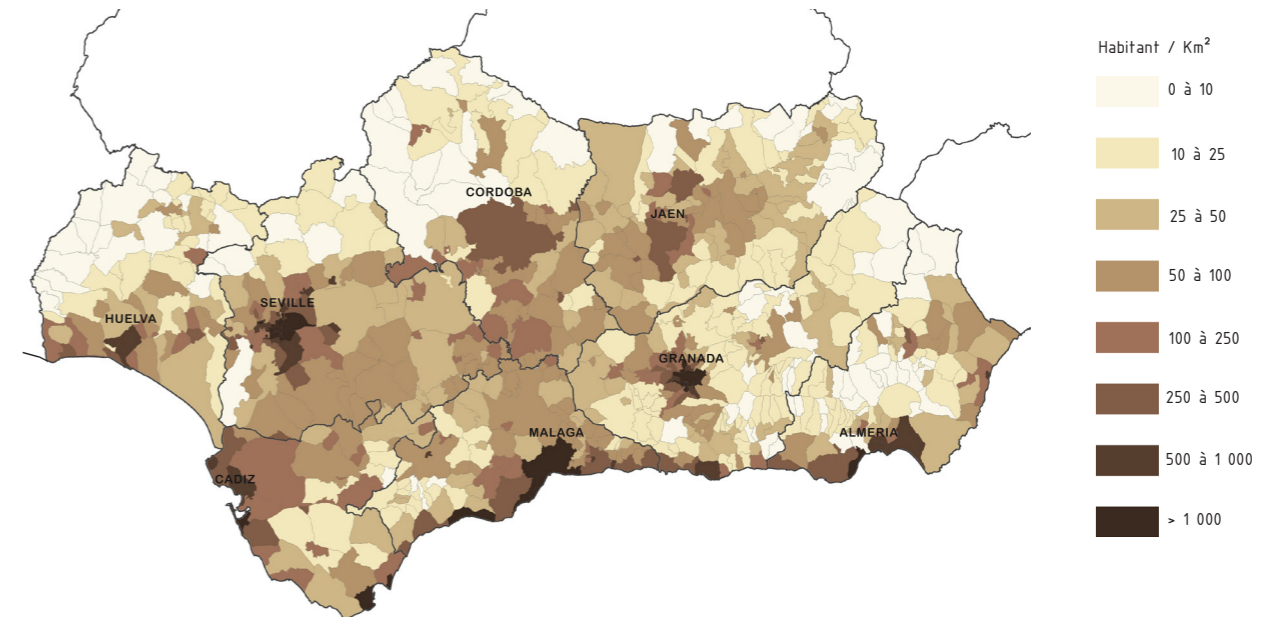
Source : Atlas Climático Ibérico, Agencia Estatal de Meteorología, 2011

Densité de la population en Andalousie

Source : ANEXO I. analisis de datos, juntadeandalucia, 2020

Moyenne du nombre de jour où la température dépasse 25°C

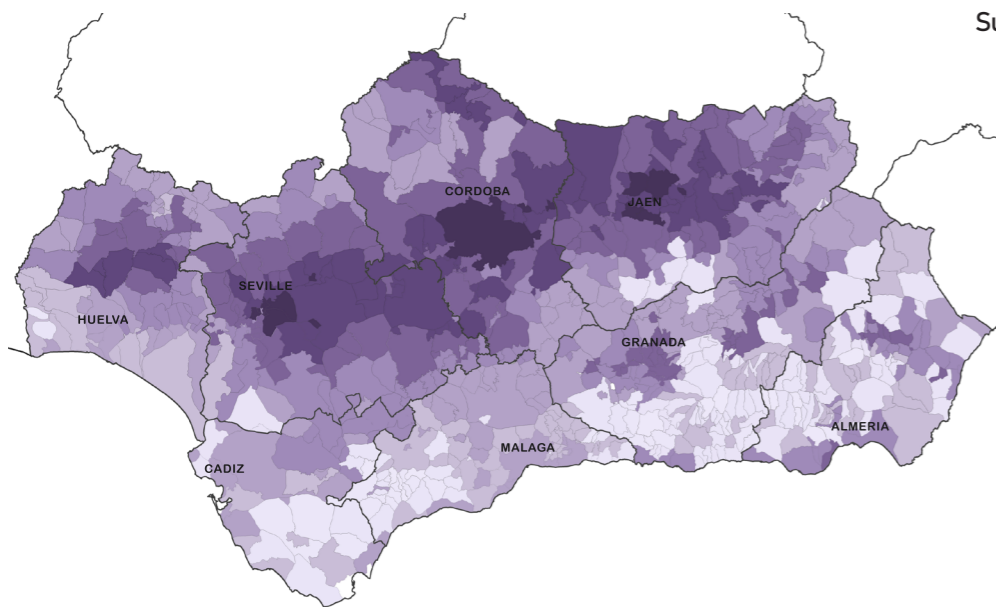
Source : Atlas Climático Ibérico, Agencia Estatal de Meteorología, 2011



La fusion de ces deux cartes nous montrera où le plus grand nombre de personnes souffrent des plus grands épisodes de fortes chaleurs

Comme on le voit sur la carte, trois villes se démarquent : Séville, Cordoue et Jaén. Jaén est une ville de 110 000 habitants bâtie sur le flanc d'une colline où le château historique Santa Catalina est perché.

Parmi ces trois villes, Jaén souffre d'un taux de pauvreté et de chômage élevé. La ville de Jaén est relativement isolée par rapport aux autres. Elle ne contient pas d'aéroport et est moins bien connectée que d'autres grandes villes comme Séville ou Grenade, et ne bénéficie pas des mêmes avantages économiques liés au tourisme. De plus, le vieillissement démographique y est marqué, ce qui augmente la vulnérabilité de la population lors des vagues de chaleur. Ainsi, Jaén est le candidat idéal pour l'implantation de mon projet.



Superposition de la densité urbaine et de la moyenne du nombre de jours supérieur à 40°C en Andalousie ◀

Auteur : Production personnelle

Jaén et sa province ▶

Auteur : Photographie personnelle



Photographie personnelle

Alors que les vagues de chaleur frappent de plus en plus intensément les régions du sud de l'Espagne, où vulnérabilités climatiques et sociales se croisent, il devient essentiel de concevoir des réponses architecturales adaptées.

Les refuges climatiques apparaissent comme une solution prometteuse. Mais comment les déployer de manière juste et efficace, afin de répondre véritablement aux besoins de la population la plus exposée ?

## CHAPITRE 3 LE PROJET ARCHITECTURAL

- A Analyse du site étudié
- B Elaboration du programme
- C Intentions du refuge
- D Concept du projet



# A Analyse du site étudié

## Jaén centre ville ▶

Auteur : Photographie personnelle



## Jaén 1900 ▶▶

Source : Andalusia informacion



Jaén est une ville profondément marquée par son histoire. La ville s'est développée au Moyen Âge au pied du château Santa Catalina, construit au sommet d'une colline qui domine la vallée. La ville médiévale est marquée par une forte densité, un tissu urbain compact et un réseau de ruelles étroites. Elle compte environ 110 000 habitants.

C'est à partir du XX<sup>ème</sup> siècle, et notamment après la guerre civile espagnole, que la ville connaît un changement majeur de morphologie urbaine. La ville se développe vers les zones plus planes, ce qui a facilité son expansion et son accessibilité.

Cette croissance a été encadrée par un plan directeur qui organise le développement des nouveaux quartiers résidentiels, des zones commerciales, des zones de loisirs et des espaces verts.

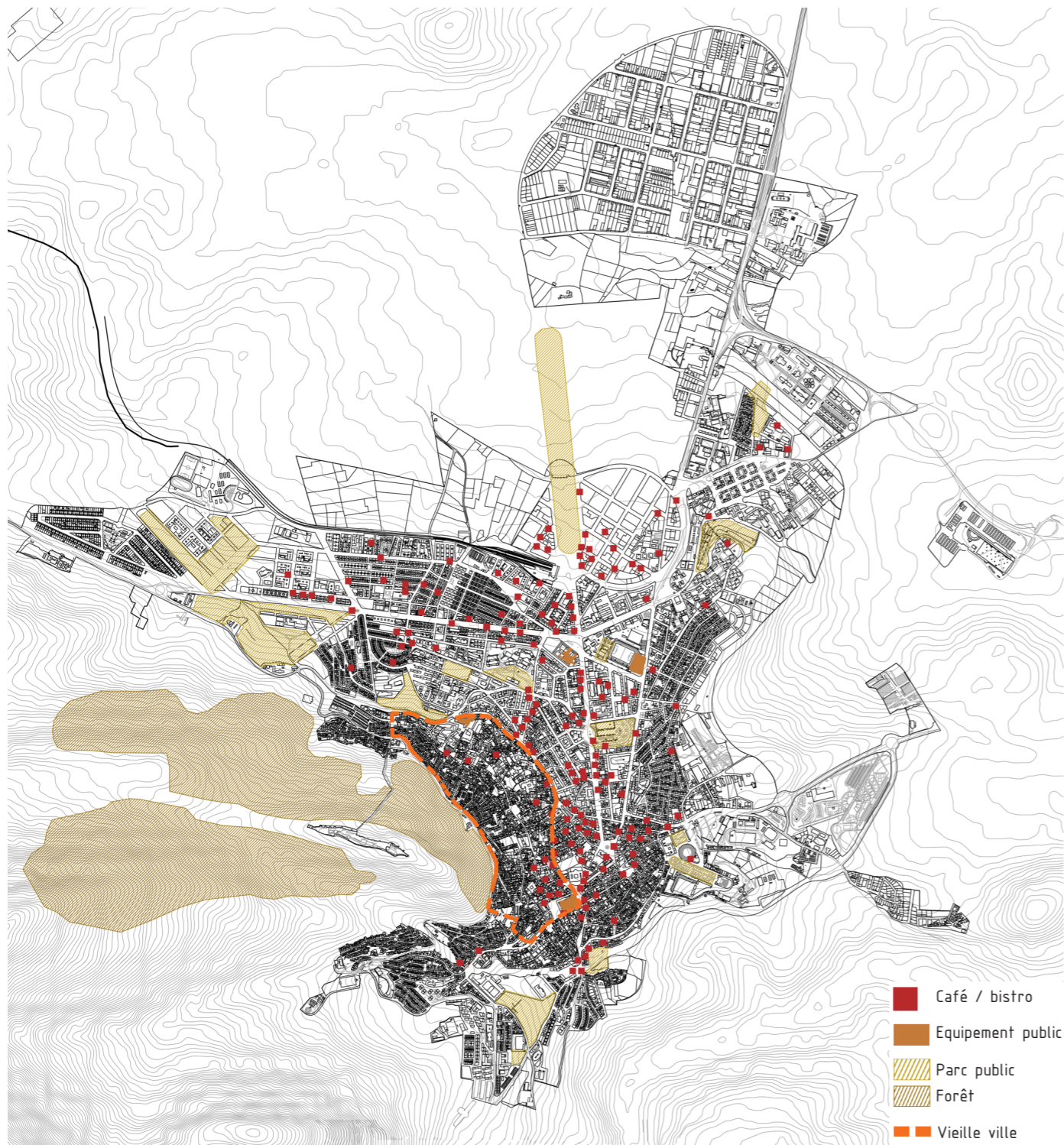
Le développement de Jaén est considérablement lié à la production d'huile d'olive. Elle compte environ 110 000 habitants.

Aujourd'hui, Jaén doit faire face à plusieurs défis contemporains : un vieillissement démographique, une dépendance à la monoculture de l'olivier et une perte de dynamisme dans son centre historique. La ville cherche à concilier les impératifs de développement urbain durable avec la préservation de son patrimoine historique.

## Champ d'oliviers, Jaén ▶

Source : La Croix, 2018

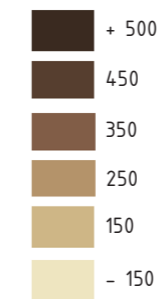




### Jaén densidad poblacion

City population, Spain, Andaloucia, Jaén

### Habitant / 1 000 m<sup>2</sup>



### Jaén de nos jours ◀

Auteur : Production personnelle

### Densité de la population ▶

Source : Andalucia informacion

On reconnaît deux typologies de morphologie différentes. La vieille ville (ville médiévale), qui s'est construite dans la pente, est la zone la plus dense.

Ses axes principaux suivent les strates de la topographie et de petites ruelles piétonnes les relie perpendiculairement. La ville contemporaine se démarque par ses larges boulevards qui relient des points clés et permettent de connecter efficacement toutes les zones de la ville.

L'expansion de la ville contemporaine a permis de développer le territoire de Jaén. Même si cela a été extrêmement bénéfique pour la ville, la vieille ville se retrouve complètement délaissée par les projets d'expansion et de développement. En effet, les boulevards autour desquels se sont concentrées les activités s'arrêtent aux portes de la vieille ville à cause de la morphologie de cette dernière. Par conséquent, les flux se canalisent autour de ces axes, ce qui concentre les dynamiques économiques et sociales dans la ville contemporaine.

Les services, commerces et loisirs préfèrent s'installer dans la ville contemporaine, plus confortable et plus attractive. On se retrouve donc face à un réel manque de services, d'équipements et de parcs publics dans la vieille ville. Pourtant, on constate que dans cette zone, la densité de population est très élevée comparée à la ville contemporaine.

Cette inégalité sociale engendre un isolement croissant des habitants de la vieille ville, qui se retrouvent marginalisés et coupés du reste de l'agglomération.

## Vieille ville de Jaén ▸

Auteur : Production personnelle

En plus des inégalités que subissent les habitants, la vieille ville souffre du mauvais entretien de son patrimoine bâti. En effet, on retrouve des maisons très vieilles (carte âge des bâtiments) qui tombent en ruine, mal isolées et qui deviennent insalubres.

De plus, le taux de chômage de la vieille ville de Jaén est de 30 % de la population, soit le double des autres quartiers de la ville. 26,5 % sont analphabètes et une partie de la population n'a pas accès à l'éducation. (Source : G. Donaire, La vieille ville de Jaén regagne de la population malgré le chômage et l'analphabétisme, El País, 2016)

Selon la présidente de l'Association des résidents, Maria Cantos, « De nombreux services manquent car ils préfèrent s'installer dans d'autres quartiers de la ville où ils vivent plus confortablement. »

Les habitants se retrouvent dans une zone défavorisée, où peu est fait pour les aider, et où ils n'ont aucun moyen direct de se protéger des fortes chaleurs. Pourtant, ce n'est pas la place qui manque dans la vieille ville. On retrouve de manière assez répandue des chancres urbains : des espaces à l'échelle de l'îlot qui ont été démolis et jamais reconstruits, laissant des espaces vides et accidentés dans le paysage historique de la vieille ville.



San Juan, la vieille ville de Jaén qui semble oubliée

M. Lopera, Ideal, 2011

### Chancres urbains

« Élément d'un site, en particulier en zone urbaine, dont la présence enlaidit l'environnement en raison de son état d'abandon ou de délabrement. »

BASE DE DONNEES LEXICOGRAPHIQUES PANFRANCOPHONE

L'un des plus grands chancre se situe devant l'école d'art José Nogué. Il s'agit d'un grand espace de 2600 m<sup>2</sup> dans une forte topographie, face à une route fréquentée. En contrebas de ce terrain se trouve une place qui a un contexte historique particulier.

Sous cette place se trouve le refuge anti-aérien Santiago. Ce refuge a été construit pendant la guerre civile espagnole avec les gravats laissés par la destruction d'une église. Ces galeries étaient un véritable refuge où des milliers de personnes venaient se réfugier lorsqu'il y avait des bombardements aériens.

Aujourd'hui, ces galeries sont devenues un musée d'exposition sur la guerre, mais ce lieu n'est ouvert au public que très rarement. Le refuge anti-aérien raccroche le lieu à un épisode historique qu'il est important de mettre en avant.



### Refuge Santiago ▷

Source : Photographie personnelle



### ◀ Chancre urbain vieille ville

Source : google.earth.com

### Galerie dans le refuge ▷

Sources : Photographie personnelle



Chercher refuge ? Le potentiel des abris climatiques urbains pour répondre aux vulnérabilités croisées

A.T. Amorim Maia, I. Anguelovski,  
J. Connolly, E. Chu

*Landscape and Urban Plannig, 2023*

Création inclusive et efficace des refuges climatiques

A.T. Amorim Maia, Barcelona Lab for  
Urban Environmental Justice and  
sustainability, 2023

Le projet profite du chancre urbain disponible dans la vieille ville pour concevoir un refuge climatique. Ce refuge sera l'opportunité de revitaliser la vieille ville de Jaén en répondant aux difficultés auxquelles elle fait face tout en proposant des espaces d'accueil frais pour subvenir aux enjeux du réchauffement climatique.

Pour élaborer le programme du refuge climatique, il faut bien saisir les enjeux et les besoins des habitants concernés. Le programme du projet se base sur les conclusions de l'étude « Création inclusive et efficace des refuges climatiques ».

La population doit avoir un accès facilité à la culture, à des activités organisées, des ateliers et des espaces de repos ou de liberté, où chacun peut faire ce qu'il souhaite selon ses besoins.

Il est donc essentiel de proposer une diversité d'espaces, à différents degrés d'intimité. Il s'agit de créer un environnement où chacun peut trouver sa place.

De cette manière, le projet prévoit :

- Des zones de végétation pour permettre aux usagers de se reconnecter à la nature, se détendre ou se promener dans un cadre apaisant.
- Des espaces de restauration afin de répondre aux besoins alimentaires dans un esprit de convivialité.
- Des espaces polyvalents conçus pour accueillir des activités associatives, sportives ou artistiques qui permettent une flexibilité d'usage en fonction des besoins du moment.
- Des ateliers d'apprentissage et d'information où chacun peut se former ou découvrir de nouvelles pratiques.
- Des espaces culturels incluant une bibliothèque qui comporte des espaces de lecture, des espaces médias, un amphithéâtre et des espaces détente, des espaces d'expositions et le musée du refuge anti-aérien.
- Il est crucial de proposer des espaces à différents degrés d'intimité de manière à ce que tout type d'utilisateur y trouve son compte. Il faut des espaces sociaux où le but est d'être ensemble et des espaces plus intimes où l'on peut se concentrer sur soi-même et se reposer à l'écart.

## C Intention du refuge climatique\_



### ◀ La faille végétale dans la ville

Source : Production personnelle

### ◀ Auvent d'entrée

Source : Production personnelle

L'insertion du projet s'inspire de la morphologie de la vieille ville. Les rues principales sont reliées par des ruelles piétonnes qui les joignent perpendiculairement. De la même manière, l'intention principale est de créer une faille piétonne végétale au centre du projet qui relie la rue en aval du site à celle en amont, parallèlement aux ruelles piétonnes du quartier. Cette faille est un véritable jardin public qui devient le prolongement de la place au-dessus du refuge Santiago. Les espaces intérieurs s'articulent autour de cette faille végétale. De cette manière, tous les éléments du programme ont un lien avec la végétation et le jardin à chaque fois différent en fonction d'où l'on se trouve dans le projet.

Comme l'a dit Norberg Schulz, « Habiter, c'est appartenir à un lieu ». Habiter, ce n'est pas qu'une signification purement fonctionnelle. Habiter a une signification profondément relationnelle, c'est-à-dire être enraciné à un lieu, faire partie d'un environnement. »

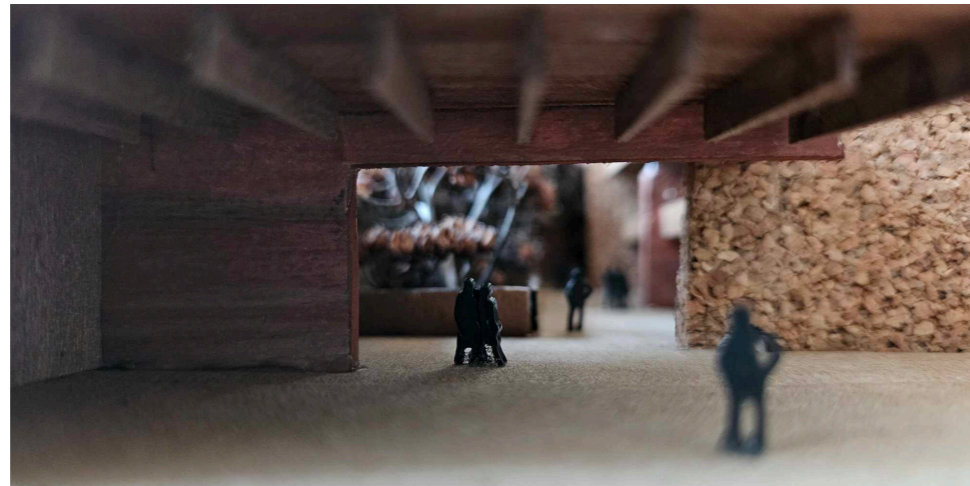
Genius Loci, p°5

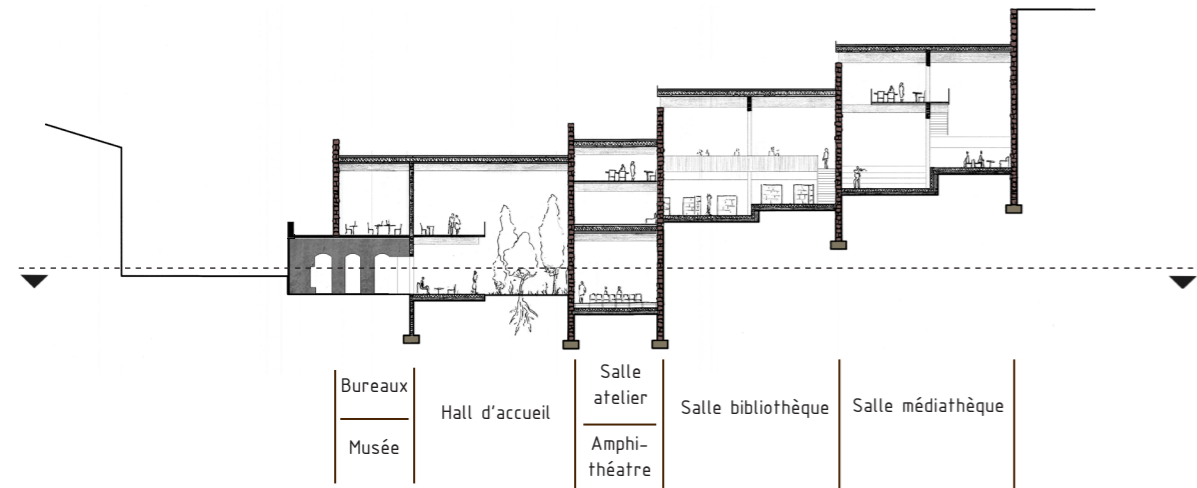
N. Schulz, 1979

De cette manière, un refuge n'est pas simplement un abri fonctionnel, mais un lieu qui place l'humain au centre et favorise les relations sociales. Il a pour vocation d'être un espace de repli, clos et protecteur, où l'on vient pour se ressourcer et s'éloigner des préoccupations du quotidien. L'objectif est de créer un « ailleurs » dans la ville, un espace de déconnexion propice au calme et à l'apaisement.

L'entrée du refuge est pensée comme un grand auvent qui s'ouvre sur la place et qui laisse entrevoir la végétation du jardin depuis la rue. Elle joue un rôle de transition. L'auvent nous abrite avant même d'entrer dans le jardin, créant ainsi un moment « entre deux » entre le ville et le refuge.

Dans la faille végétale, nous sommes protégés par la morphologie qui s'adapte à la topographie du site pour former une série de petits jardins suspendus. La canopée combinée à la présence de murs massifs, enveloppe l'espace et oriente les regard vers le poumon vert du projet. L'ensemble est conçu autour de la nature, invitant les usagers à ce reconnecter à cette dernière et à soi-même.



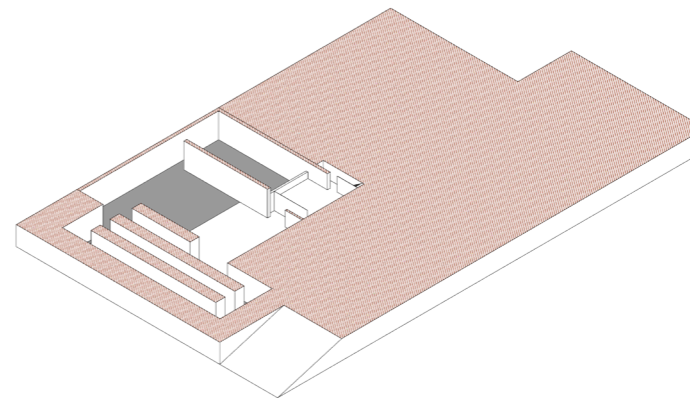


### ◀ Bibliothèque

Auteur : Production personnelle

### Niveau 0 ▶

Auteur : Production personnelle

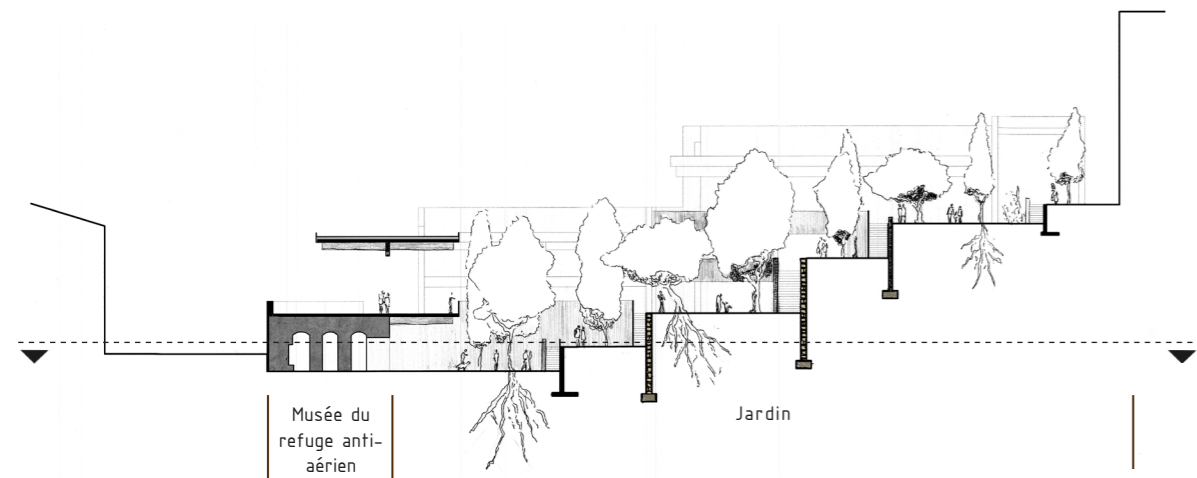


Le niveau 0 se situe à 1,5 m en dessous du niveau de la rue. L'espace intérieur côté sud correspond à l'étage le plus bas de la bibliothèque.

Les jardins de la faille descendent jusqu'à ce niveau et viennent se prolonger à l'intérieur de la bibliothèque, faisant de cet espace le jardin d'hiver. Cet espace d'accueil est aménagé comme un salon végétalisé.

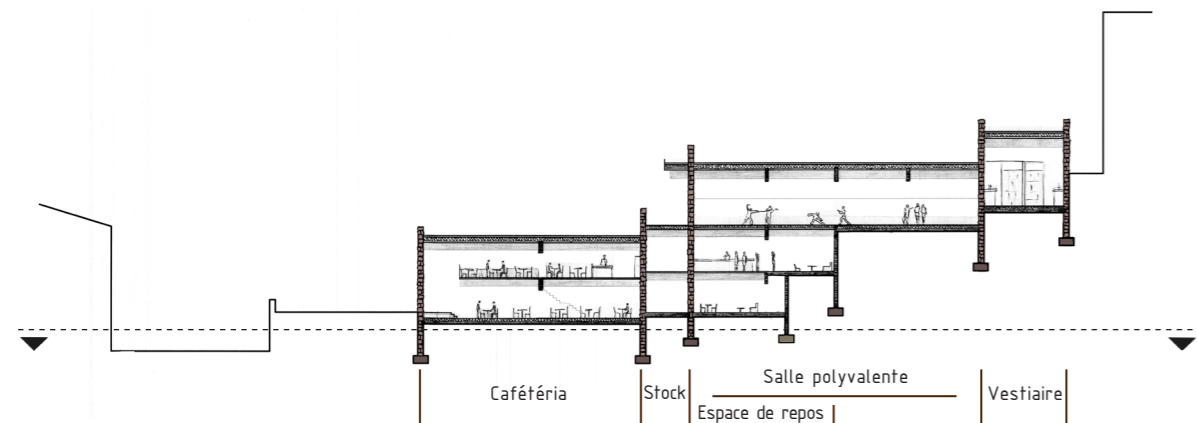
Ce niveau est marqué par la présence de l'ancien refuge anti-aérien avec ses galeries très massives. Il est accessible et entièrement ouvert sur le jardin d'hiver.

À côté de cet espace se trouve l'amphithéâtre qui est semi enterré par rapport au jardin situé face à lui. Un décalage par rapport au mur de soutènement permet une coulée de lumière qui éclaire l'estrade.



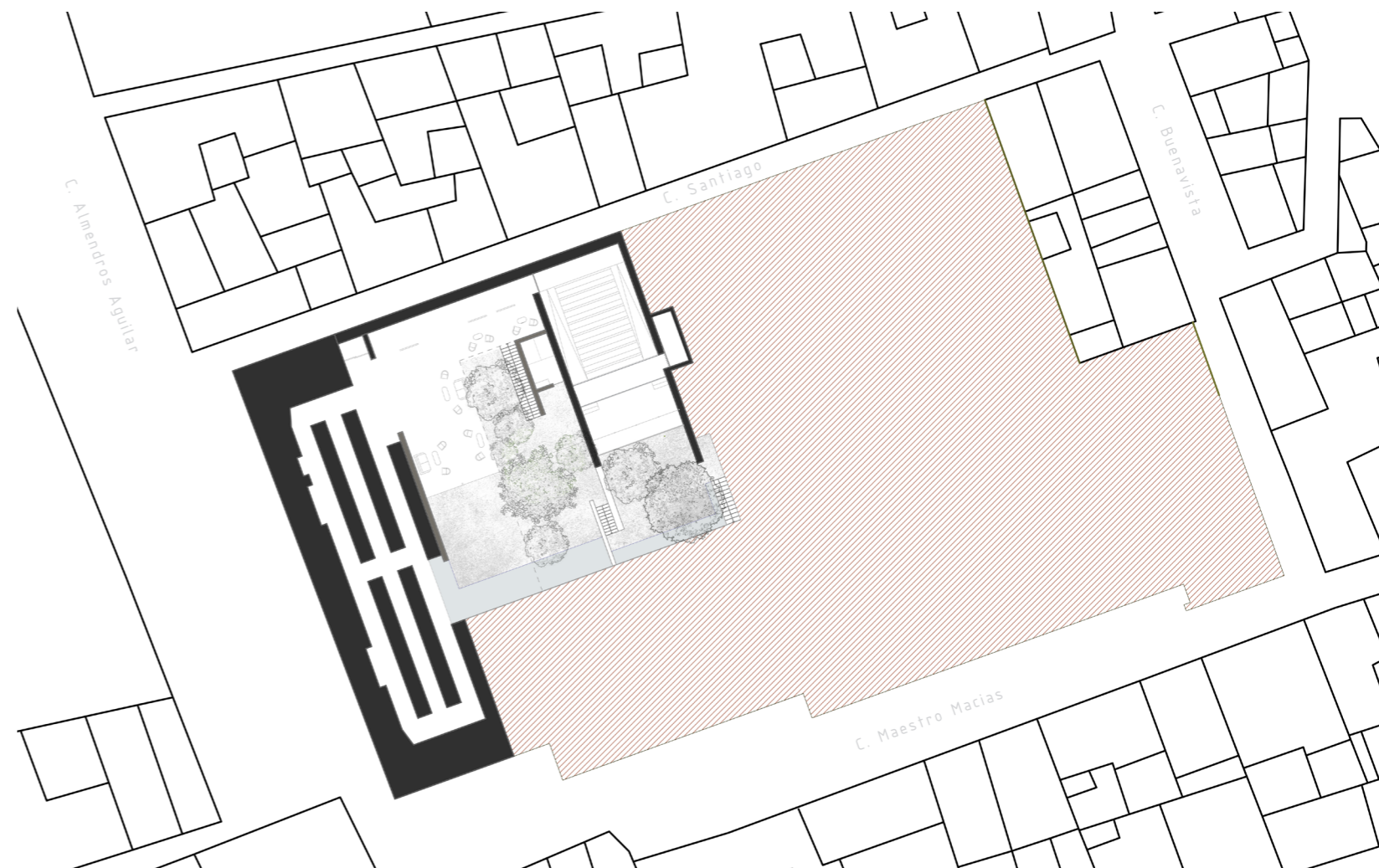
### ◀ Jardin

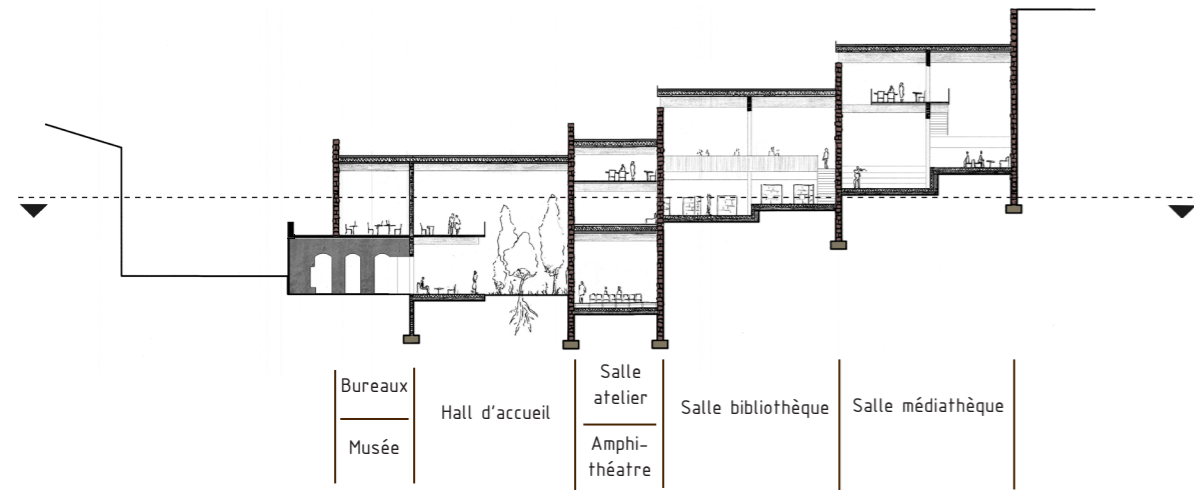
Auteur : Production personnelle



### ◀ Restauration / Salle polyvalente

Auteur : Production personnelle



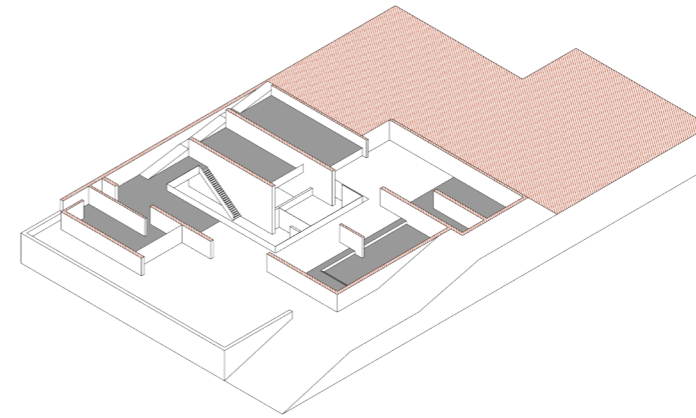


### ◀ Bibliothèque

Auteur : Production personnelle

### Niveau 1 ▶

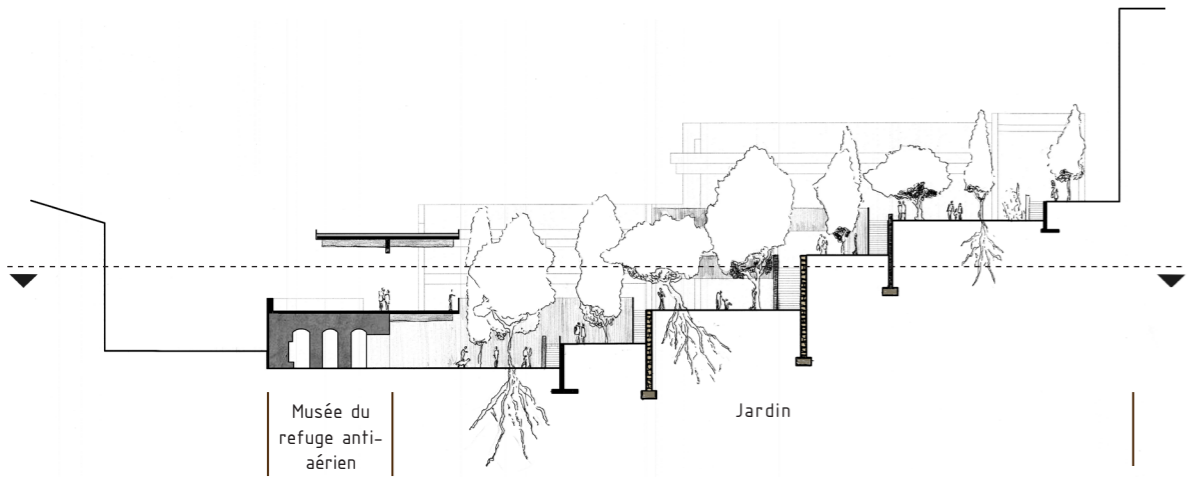
Auteur : Production personnelle



L'entrée du refuge se fait par le niveau 1, depuis la place, en passant sous le auvent. En continuant tout droit, on arrive dans le parc, lui-même composé de plusieurs petits jardins. Ces derniers sont plus ou moins ouverts, permettant à chacun d'y trouver sa place selon le degré d'intimité recherché pour se promener ou se reposer.

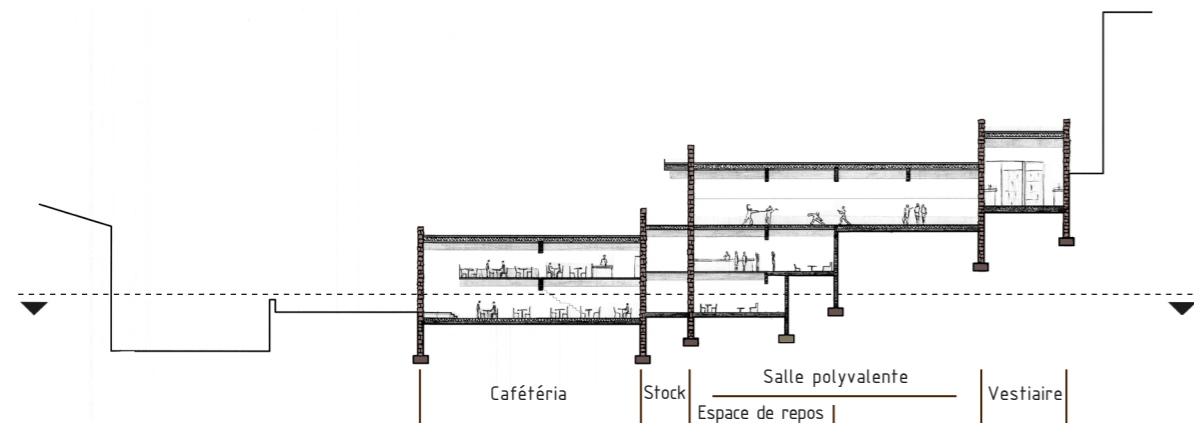
Au sud, se trouve l'accueil de la bibliothèque qui surplombe le jardin d'hiver. Une grande rampe qui longe le mur de pierres permet d'accéder aux différents espaces. La première salle est celle des ateliers. Cet espace est dédié à l'organisation de réunions, d'ateliers ou d'activités collectives. La deuxième est la salle de lecture, où l'on peut lire ou travailler face au jardin, sur la terrasse ou sur la mezzanine.

De l'autre côté, au nord, se trouve la salle de restauration avec une grande pièce équipée de grandes tables partagées pour favoriser les interactions sociales.



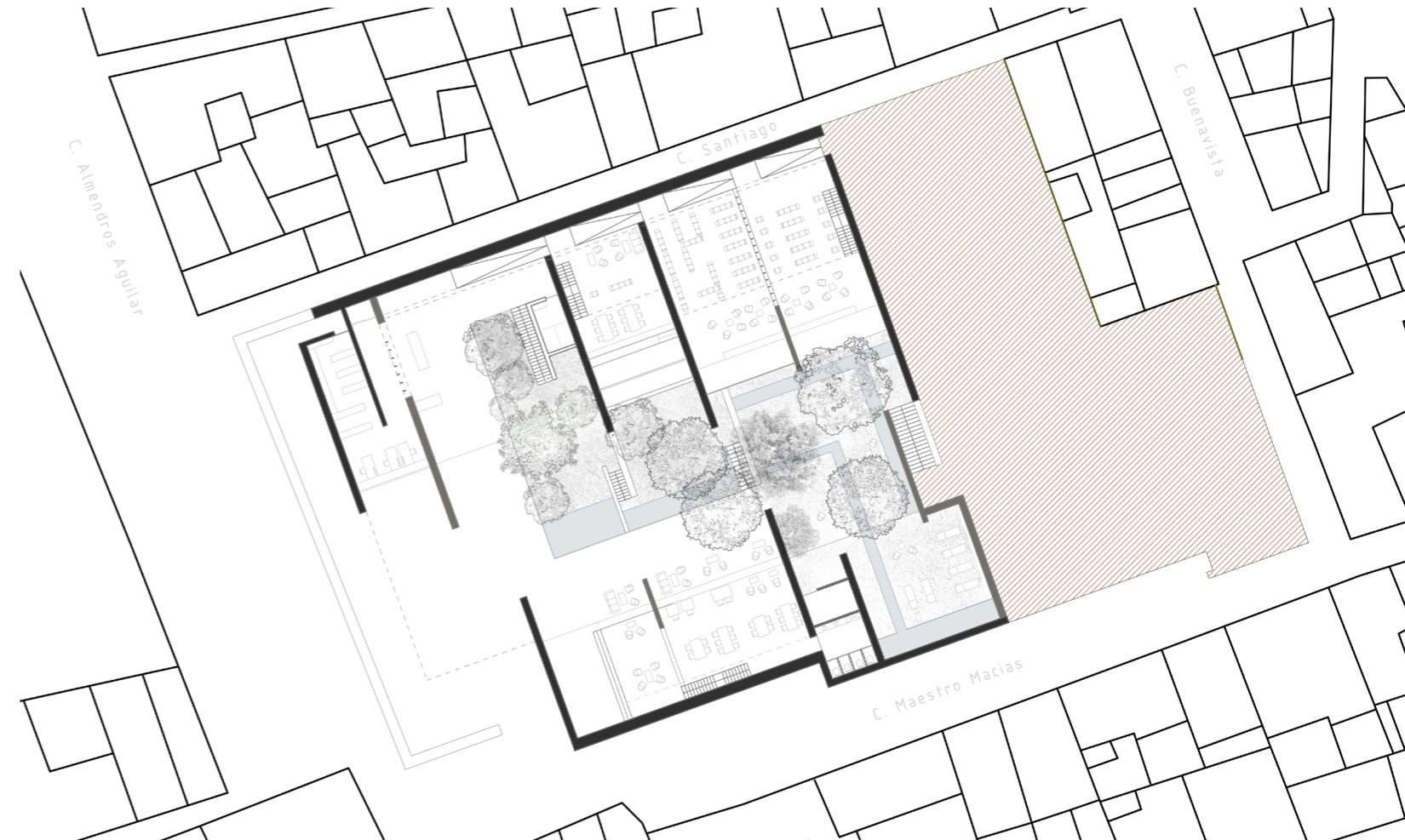
### ◀ Jardin

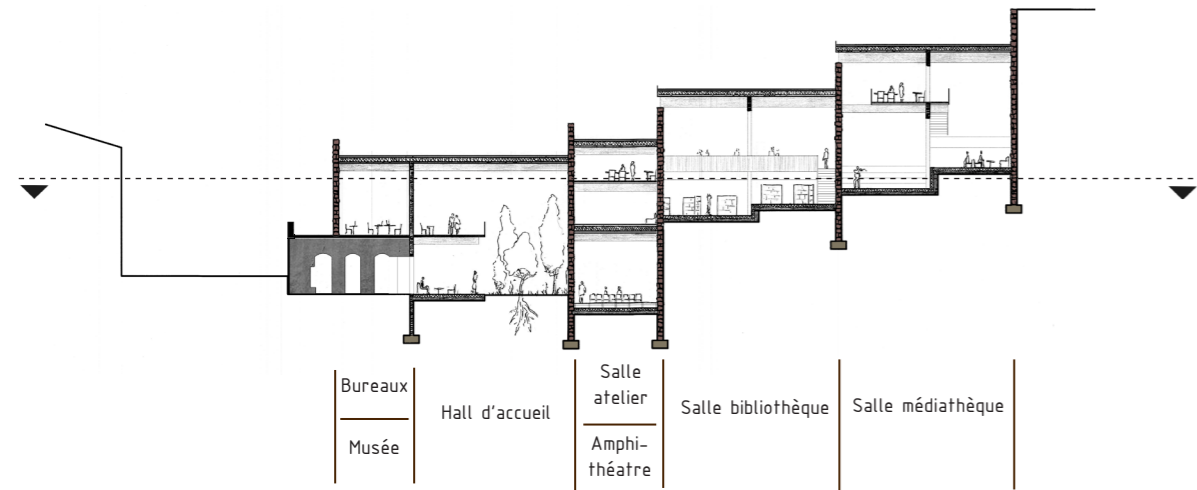
Auteur : Production personnelle



### ◀ Restauration / Salle polyvalente

Auteur : Production personnelle



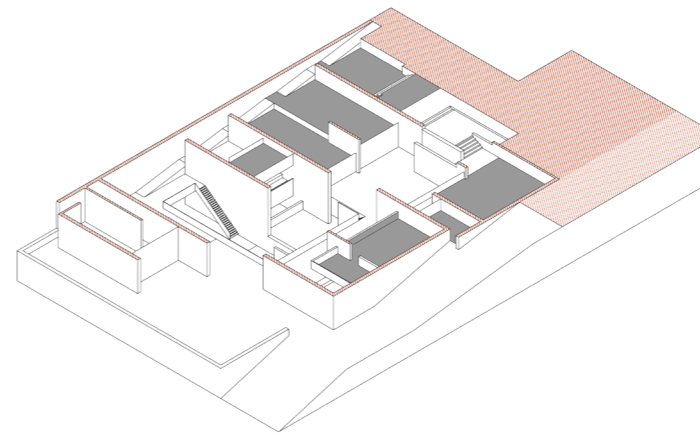


### ◀ Bibliothèque

Auteur : Production personnelle

### Niveau 2 ▶

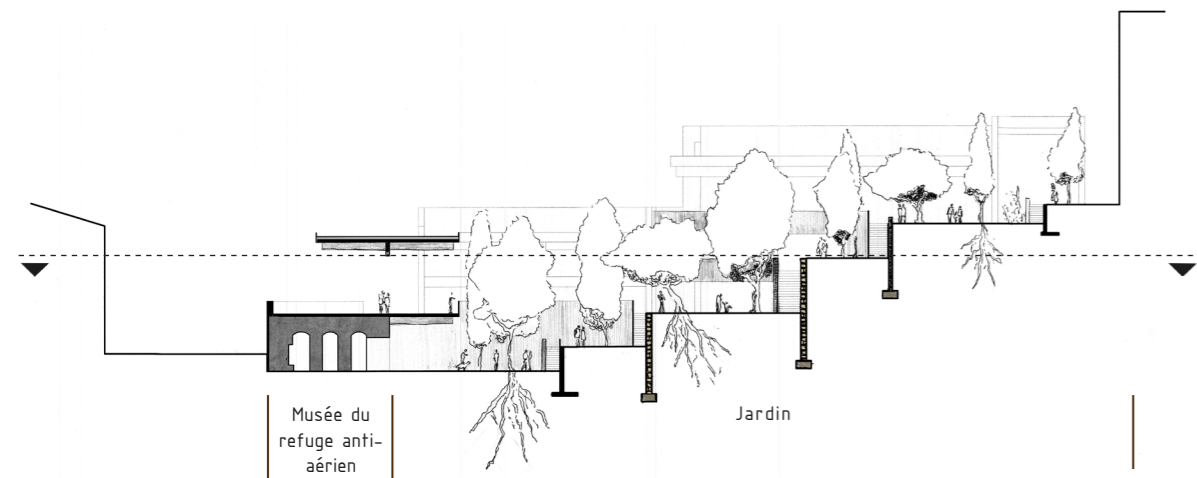
Auteur : Production personnelle



On retrouve au niveau 2 la troisième salle de la bibliothèque. Plus polyvalente, elle permet d'organiser de petits rassemblements et des présentations. Elle est également accessible par une terrasse du jardin.

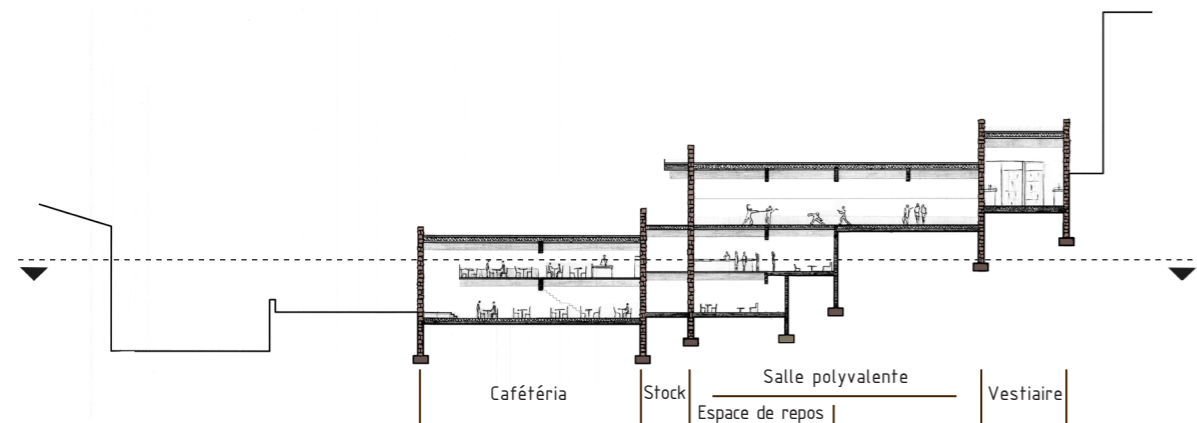
Côté nord, dans le restaurant, se trouve la petite cuisine. La salle de stockage se trouve dans la pièce adjacente, directement accessible depuis la rue. Un petit balcon donnant directement sur la canopée pour boire un verre.

Un espace extérieur couvert et multifonctionnel est également accessible depuis le jardin. Il permet de s'abriter de la chaleur tout en restant à l'extérieur. Cet espace peut autant accueillir des grandes réunions qu'être un lieu où l'on se repose face à la nature.



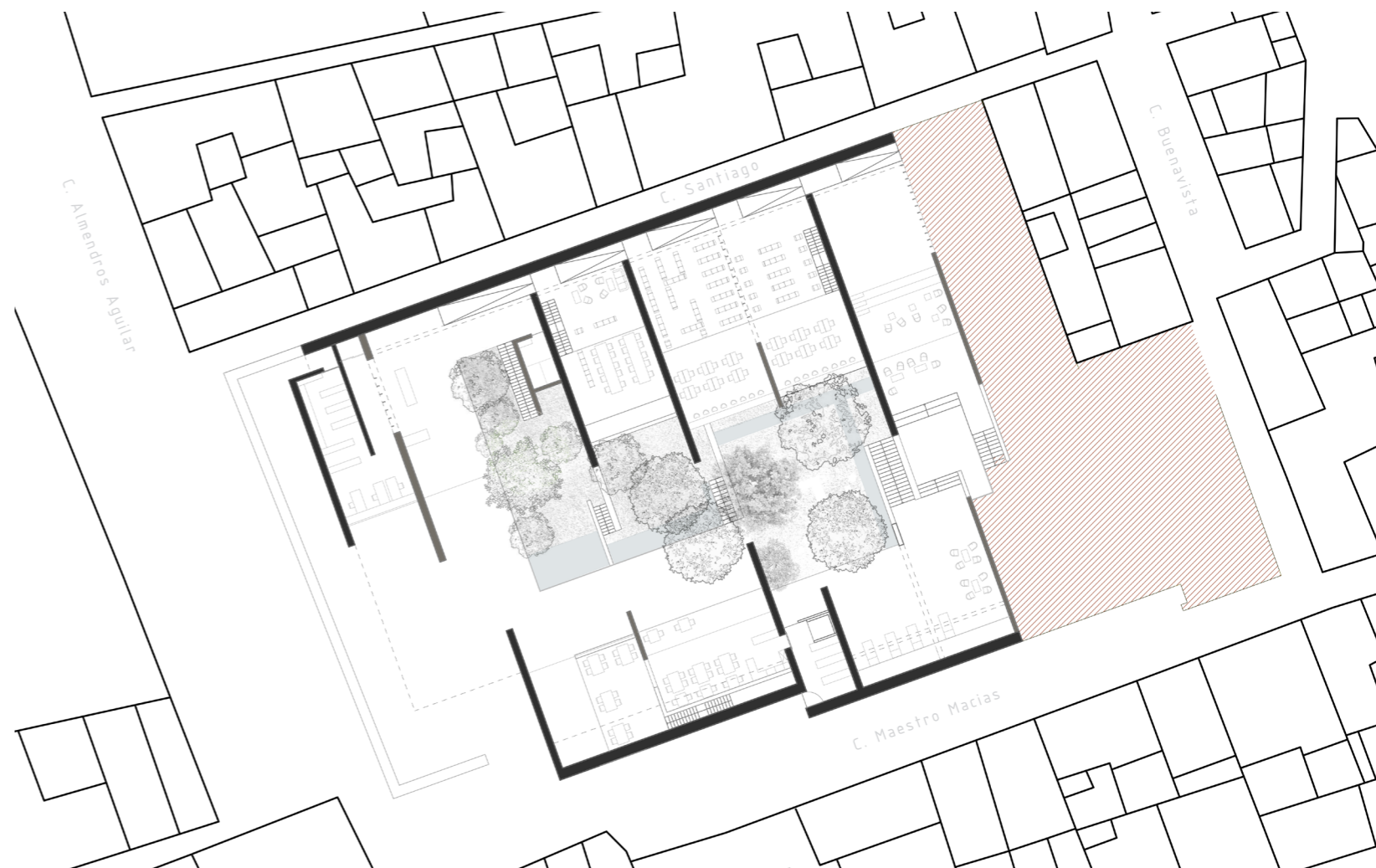
### ◀ Jardin

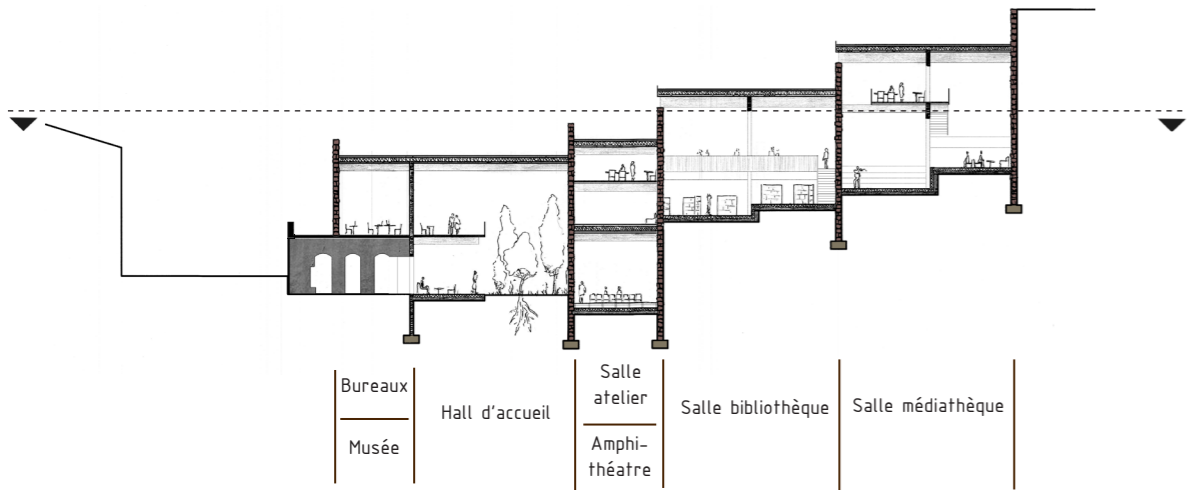
Auteur : Production personnelle



### ◀ Restauration / Salle polyvalente

Auteur : Production personnelle



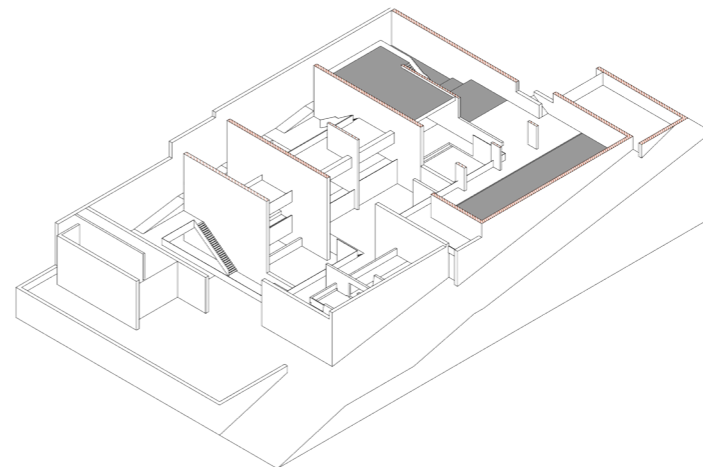


### ◀ Bibliothèque

Auteur : Production personnelle

### Niveau 3 ▶

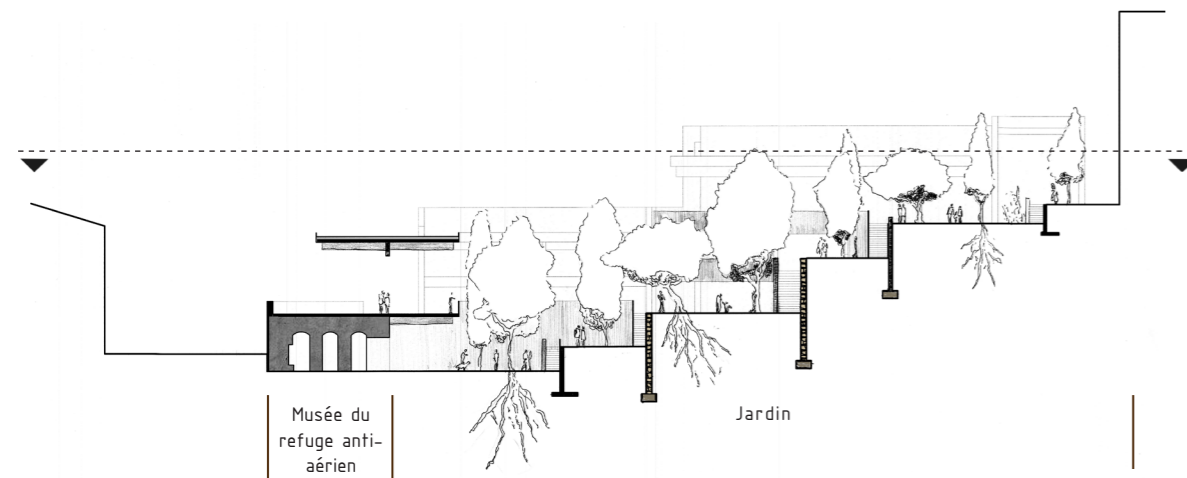
Auteur : Production personnelle



Au dernier niveau, la bibliothèque comprend un espace multi média avec un étage supplémentaire donnant accès à une zone équipée d'outils numériques.

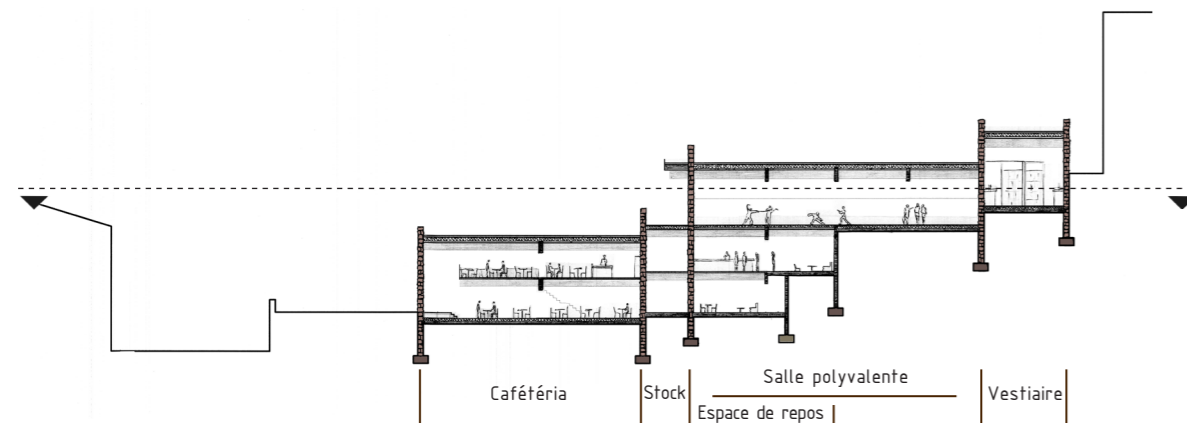
De l'autre côté du jardin, se trouve une grande salle polyvalente totalement libre, destinée à accueillir différentes associations sportives, artistiques et des expositions. Au bout de cette salle, un large balcon offre une vue panoramique sur la ville de Jaén en contre-bas.

Le jardin public se prolonge jusqu'à la rue Buenavista.



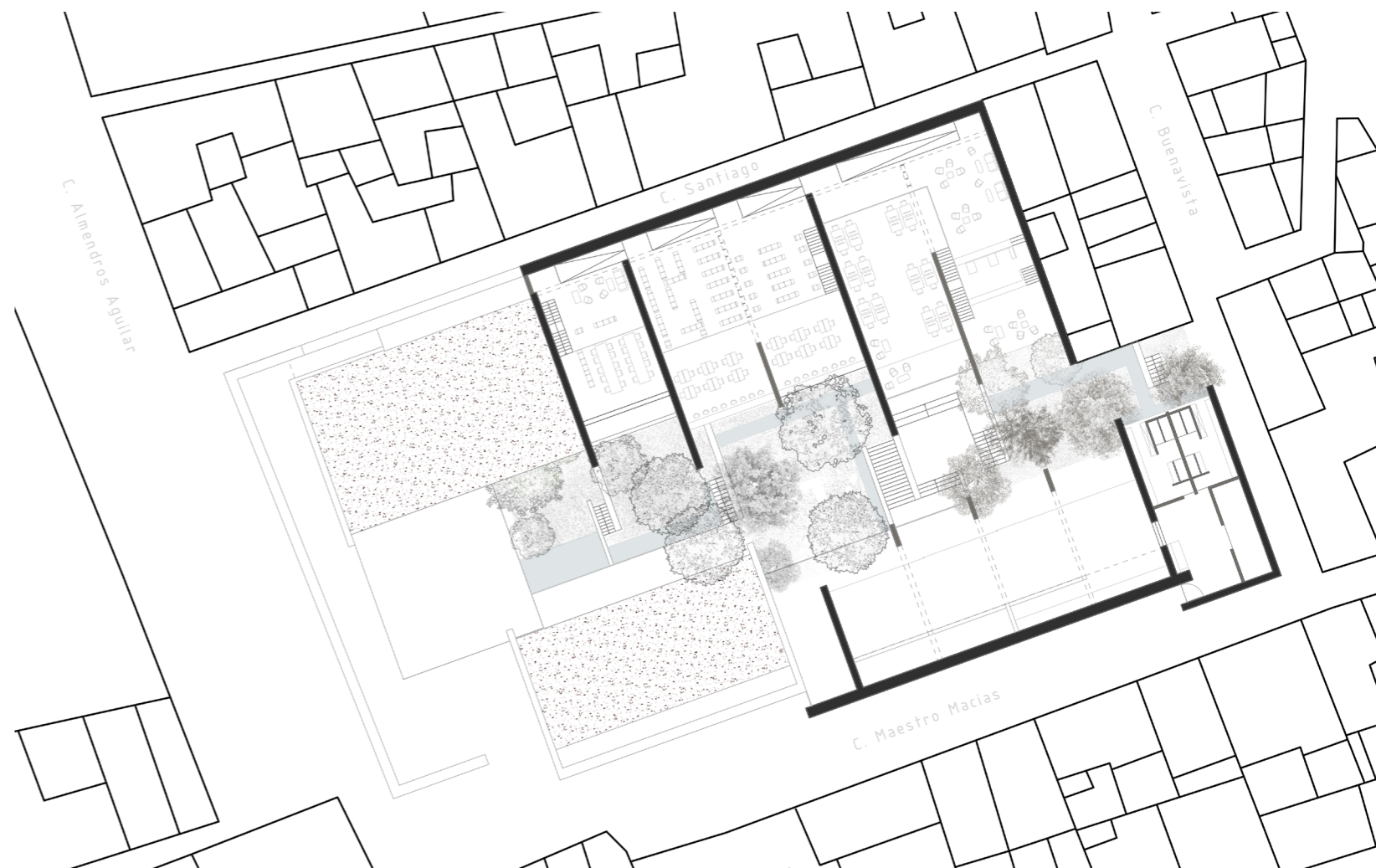
### ◀ Jardin

Auteur : Production personnelle



### ◀ Restauration / Salle polyvalente

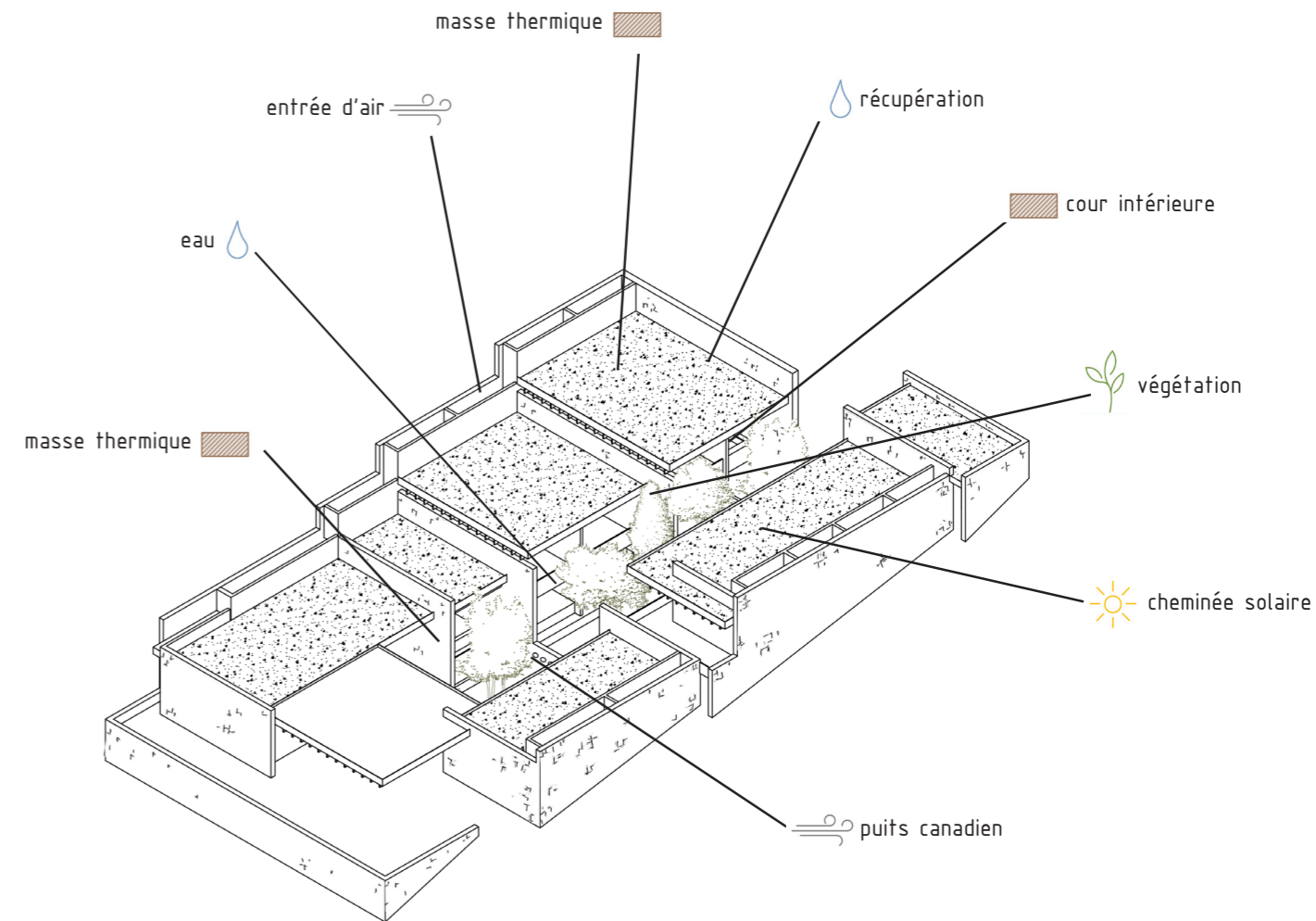
Auteur : Production personnelle



# D Concept du projet

## Ressources naturelles utilisées

Auteur : Production personnelle



Le concept du projet est de concevoir un équipement public qui conserve l'air intérieur frais de manière naturel, même pendant les épisodes caniculaires. Pour ce faire, le projet est composé de systèmes de ventilations et de climatisations naturelles qui utilisent le contexte environnemental comme ressource pour limiter la montée des température à l'intérieur.

De plus, la construction de nouveaux bâtiments doit être pensée de manière raisonnée, avec une vision à long terme de leur cycle de vie. Il s'agit de privilégier une conception adaptable, capable d'évoluer dans le temps et de répondre à des nouveaux besoins.

L'enjeu est donc de répondre aux besoins de la vieille ville de Jaén à court et long terme en proposant une architecture qui reconnecte la population à leur patrimoine en utilisant des ressources locales et environnementales pour les abriter.

## Ressources naturelles utilisées :



SOLEIL



EAU



MASSE



VENT



VEGETATION

Le projet présenté ici s'appuie sur des savoirs historiques et vernaculaires, sur l'observation des phénomènes naturels liés à l'environnement et au climat, pour apporter une réponse pertinente à ces défis contemporains.

Au-delà de la simple protection contre la chaleur, il intègre une approche globale du confort en prenant en compte le confort thermique ainsi que le confort visuel dans le but de créer des espaces agréables et fonctionnels.

## CHAPITRE 4 UNE CONCEPTION LIÉE AU CONTEXTE

- A Description des éléments bioclimatiques mis en place
- B Système de climatisation et de ventilation naturelle
- C Confort thermique
- D Confort visuel



# A Descriptions des éléments bioclimatique mis en place

## MASSE THERMIQUE

La masse thermique d'un matériau se caractérise par l'inertie thermique de ce dernier.

### Inertie thermique

« Capacité d'un matériau à accumuler de la chaleur ou de la fraîcheur, puis à la restituer. L'inertie permet donc d'écrêter, d'aplanir les pics de température de jour, comme de nuit. »

GUIDE BATIMENT DURABLE, BRUXELLES ENVIRONNEMENT  
2013

Conférence au certificat en design de bâtiment écologique de Solution ERA  
L. Muydermans, 2020

De manière générale, les matériaux absorbent la chaleur de l'air ambiant afin d'équilibrer leur température avec celle de leur environnement. Cependant, lorsqu'ils sont en extérieur, ils sont aussi soumis aux rayons du soleil qui, en fonction de l'albédo, augmentent leur température. La masse absorbe donc l'énergie du rayonnement sous forme de chaleur, la stocke tant que l'apport d'énergie reste constant, et la restitue en réchauffant l'air ambiant si sa température est plus faible que celle du matériau.

Les matériaux à forte masse thermique, souvent lourds et denses, mettent plus de temps à restituer la chaleur que ceux ayant une faible inertie thermique. En effet, plus un matériau est dense, plus le transfert de chaleur est lent puisqu'une plus grande masse doit être chauffée ou refroidie.

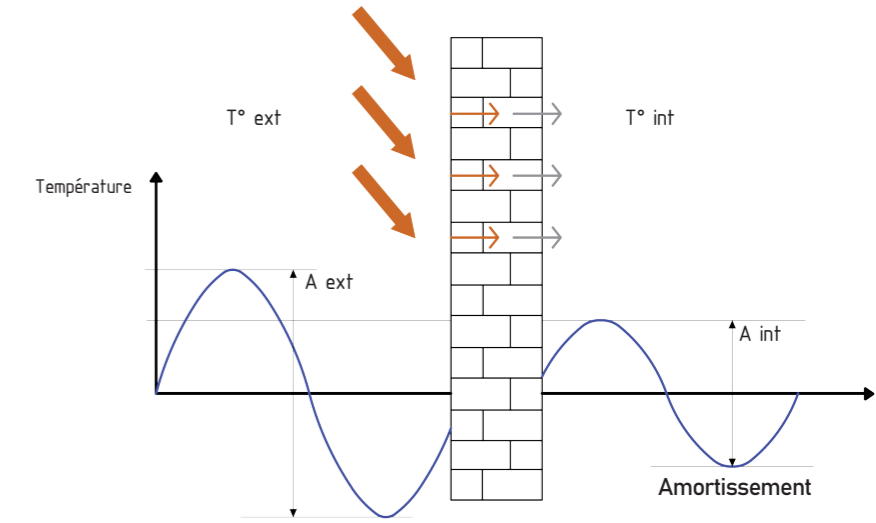
Caractéristique thermique dynamique, déphasage et amortissement  
Gwenan ingénieur, 2012

La température intérieure d'un bâtiment est influencée par le rayonnement solaire direct sur ses parois. Cette énergie absorbée par les matériaux est ensuite diffusée à l'intérieur du bâtiment par convection. Dans le cas d'une paroi à forte inertie thermique, le transfert de chaleur entre la paroi et l'air intérieur sera plus lent. En effet, la chaleur sera absorbée progressivement par le matériau, c'est le phénomène de déphasage, puis restituée plus tard à l'intérieur, idéalement pendant la nuit. De plus, seule une partie de cette chaleur est transmise car l'intensité thermique diminue lors de sa propagation à travers l'épaisseur de la paroi : c'est ce qu'on appelle l'amortissement.

Une bonne inertie thermique permet de limiter les hausses de température intérieure en journée, pour idéalement la restituer pendant la nuit.

Tout savoir sur l'inertie thermique  
Quelle energie, EFFY, 2024

Thermal inertia and passive solar design  
J. Carmelitt, EPFL, 2016

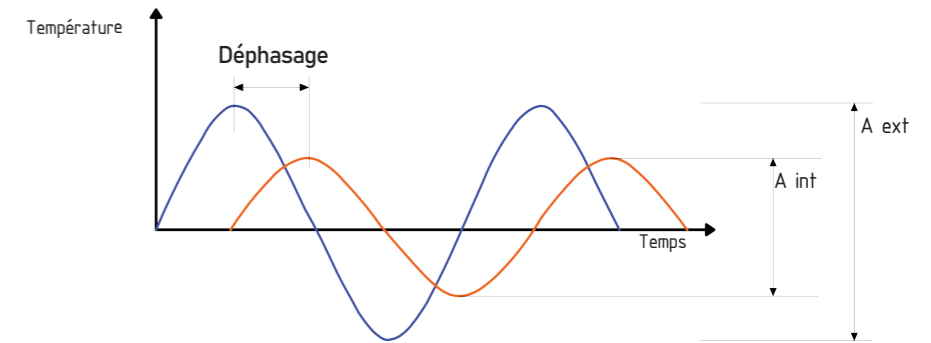


### Amortissement ▶

Auteur : Production personnelle

### Déphasage ▶

Auteur : Production personnelle



### Classement de différents matériaux de construction par inertie thermique ▶

Source : Arktic, 2014

Il est possible de quantifier l'inertie thermique car elle dépend de facteurs précis : la chaleur massique du matériau (c), sa masse (m), et sa température (T). Ainsi, la quantité de chaleur stockée dans un matériau (Q) est mesurable par la formule suivante :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

m : masse du matériau (kg)  
c : capacité thermique massique (J/kg\*K)  
 $\Delta T$  : variation de température (°C)

MATERIAUX	CAPACITE THERMIQUE (J/kg*K)	MASSE VOLUMIQUE (kg/m³)	INERTIE THERMIQUE (kJ/m².K)
Pierre	900	2800	2790
Béton	1040	2500	2610
Terre crue	995	2200	2200
Terre cuite	1125	1600	1800
Bois	1600	600	960
Brique alvéolée	840	700	586

## COURTYARD EFFECT

### Les effets des cours sur la performance thermique

S. Hao, C. Yu, Y. Xu, C. Yehao, 2019

L'effet cour intérieure repose sur une configuration architecturale traditionnelle exploitée dans les climats chauds et secs, notamment au Moyen-Orient (maisons traditionnelles iraniennes). Ce dispositif vise à créer un microclimat local plus frais que l'environnement extérieur, en particulier au sein d'une cour centrale entourée de bâtiments.

L'effet cour intérieure limite la montée des températures dans la cour par rapport à la température extérieure. Cela est rendu possible grâce à plusieurs principes :

#### Optimisation géométrique de la cour :

Une cour étroite et entourée de murs élevés reste majoritairement ombragée tout au long de la journée. Cette configuration limite l'exposition directe des surfaces de la cour au soleil, réduisant l'échauffement du sol et des parois par rayonnement. La forme et l'orientation de la cour influencent la distribution du rayonnement solaire. Une cour de forme rectangulaire avec un bon rapport Hauteur/Longueur des parois, une profondeur modérée, et une orientation nord-sud des façades principales permettent d'optimiser la fraîcheur intérieure en réduisant l'exposition au soleil pendant la journée. Des cours étroites et profondes peuvent réduire jusqu'à 65 % des

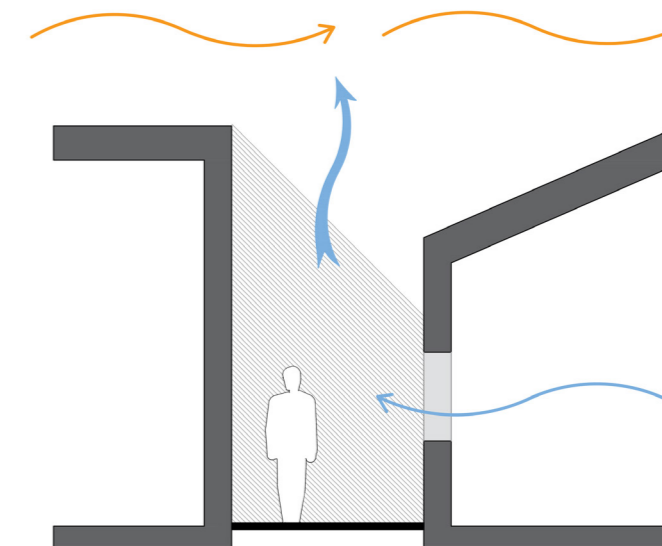
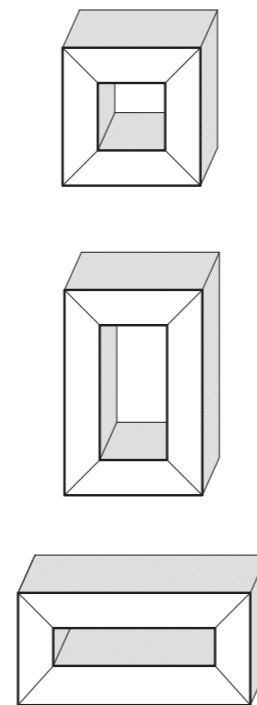
#### Inertie thermique et stockage différé de la chaleur :

Les murs massifs qui entourent la cour, peu exposés au soleil, restent plus frais et emmagasinent moins de chaleur en journée. Cela permet de limiter la hausse de température de l'air ambiant et de maintenir des parois froides qui contribuent au confort thermique.

#### Ventilation naturelle (effet de tirage thermique) :

La différence de température entre l'air chaud extérieur et l'air plus frais au sein de la cour crée une circulation naturelle de l'air. L'air chaud est évacué vers le haut, favorisant le renouvellement d'air plus frais dans la cour et les pièces attenantes.

La superposition de l'ensemble de ces éléments permet de configurer des cours qui limitent l'ensoleillement direct sur les surfaces au sol et les façades. L'ombrage naturel qu'elles procurent contribue à réduire l'élévation thermique des matériaux urbains et à empêcher le réchauffement excessif de l'air ambiant dans la cour.



### Effets de refroidissement passif des cours

Safarzadeh, N. Bahadori, 2005

### Ombre portée dans la cour

Auteur : Production personnelle

### Aspiration dans la cour

Auteur : Production personnelle

### Cour intérieure Alhambra à Grenade

Source : Alhambra.grenade





La présence de l'eau dans un système est un élément qui peut rafraîchir ce système par évaporation. Les changements de phase, tels que l'évaporation, impliquent des variations d'énergie qui apparaissent lorsque les liaisons entre les molécules se rompent ou se forment. C'est ce qu'on appelle la chaleur latente.

### Chaleur latente de vaporisation

« Chaleur latente de vaporisation : énergie nécessaire pour transformer un liquide en gaz à température constante »

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, SCIRP, TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, ASSESSMENT  
2013

[Latent Heat, an overview](#)  
sciencedirect topics, 2001

Cette énergie est puisée sous forme de chaleur dans l'air ambiant. Cette perte d'énergie implique une diminution de la température locale.

Il s'agit du même mécanisme que pour la transpiration lorsqu'une personne a trop chaud. Un corps transpire pour réduire sa chaleur interne. Pour ce faire, il laisse de l'eau sous forme de transpiration sur la peau. Lorsque cette transpiration s'évapore, le même système de perte d'énergie s'opère sur la peau, réduisant la température du corps.

De cette manière, plus l'eau s'évapore facilement, plus l'effet de refroidissement sera important. Des dispositifs qui propagent des gouttelettes plus facilement évaporables, comme des fontaines, des cascades artificielles ou des brumisateurs, s'avèrent plus efficaces que de l'eau stagnante.

[Améliorer la ville : des solutions basées sur la nature](#)  
environnement.brussels, 2025

Selon *Bruxelles Environnement*, dans le cas d'une fontaine à jet à Tokyo, une réduction de 1 à 2°C de la température de la zone localisée sous le vent a été constatée (Kimoto et al. 1998). Au niveau des espaces publics, les dispositifs de cheminements d'eau peuvent avoir un effet rafraîchissant sous réserve qu'ils soient correctement conçus et dimensionnés pour l'espace à rafraîchir.

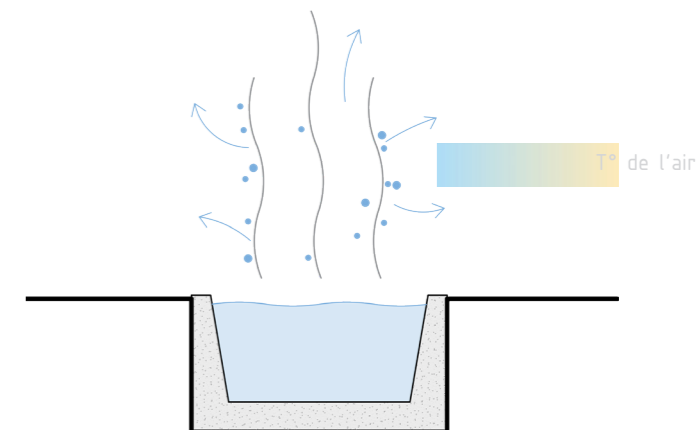
[L'effet des éléments eau et végétation comme modificateurs du microclimat dans les bâtiments des climats tropicaux chauds et humides](#)

B. SHamzah, M. Hamdy, R. Wekantari,  
R. Mulyadi 2023

Les architectes du Nipah Mall, un centre commercial situé Makassar en Indonésie, ont étudié l'impact d'un bassin d'eau et d'une cascade artificielle sur la température intérieure du bâtiment. Associée à une végétation intérieure et une ventilation naturelle, on obtient une baisse d'environ 4°C de la température ambiante autour de la cascade. Les relevés effectués montrent que lorsque la température extérieure atteint 31°C, celle mesurée à l'intérieur est de 27,4°C, soit une diminution de 3,7°C dans un espace aussi grand.

### Effet de l'évaporation de l'eau sur la température de l'air

Auteur : Production personnelle

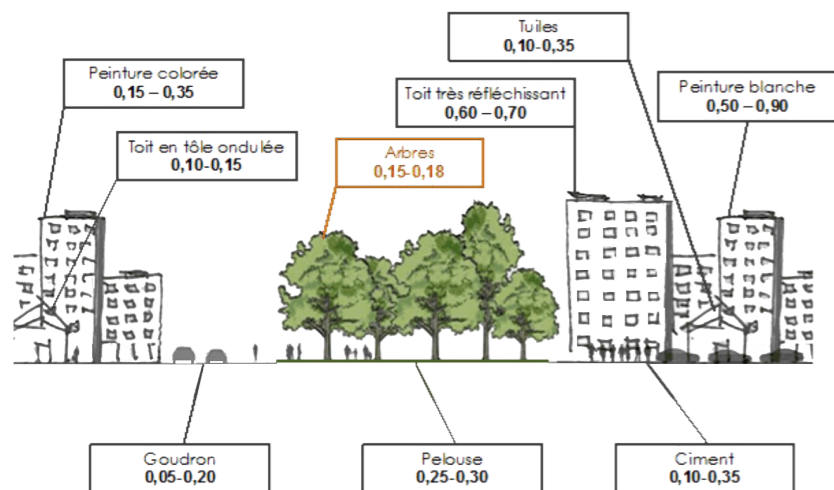


### Nipah Mall, Makassar, Indonésie

Source : Kalsi building solutions



La végétation permet, dans un premier temps, d'éviter la montée des chaleurs due au rayonnement solaire, surtout en milieu urbain. Cela est rendu possible grâce à l'albédo, qui est plus élevé (0,3) que celui d'autres surfaces minérales comme le bitume ou le béton (< 0,1). L'albédo d'une plante permet de réfléchir 30 % du rayonnement solaire et d'en absorber 50 % par son feuillage. De cette manière, seulement



De plus, les plantes absorbent l'eau par leurs racines et le dioxyde de carbone par leur feuillage. En contrepartie, elles rejettent de l'oxygène ainsi que de l'eau. Le rejet d'eau des plantes se fait par leurs feuilles, sur lesquelles on trouve de minuscules orifices appelés stomates. Il s'agit du phénomène d'évapotranspiration.

### Evapotranspiration

« L'évapotranspiration est un processus continu causé par l'évaporation d'eau, prélevée par les racines, au niveau des feuilles stomates et qui permet à celles-ci de maintenir à leur surface une température acceptable ainsi que la circulation de la sève »

DES STOMATES FLUORESCENTS POUR COMPRENDRE LES ECHANGES GAZEUX CHEZ LES PLANTES

A. De Angeli, CNRS Biologie

Chaleurs urbaines, la considération des îlots de chaleur urbains dans les projets d'aménagement

V. Guérineau, 2022

Ainsi, les végétaux, comme les arbres, créent des espaces protégés en limitant les apports solaires grâce à leur ombrage et en évaporant de l'eau. Le tout contribue à rafraîchir l'air ambiant.

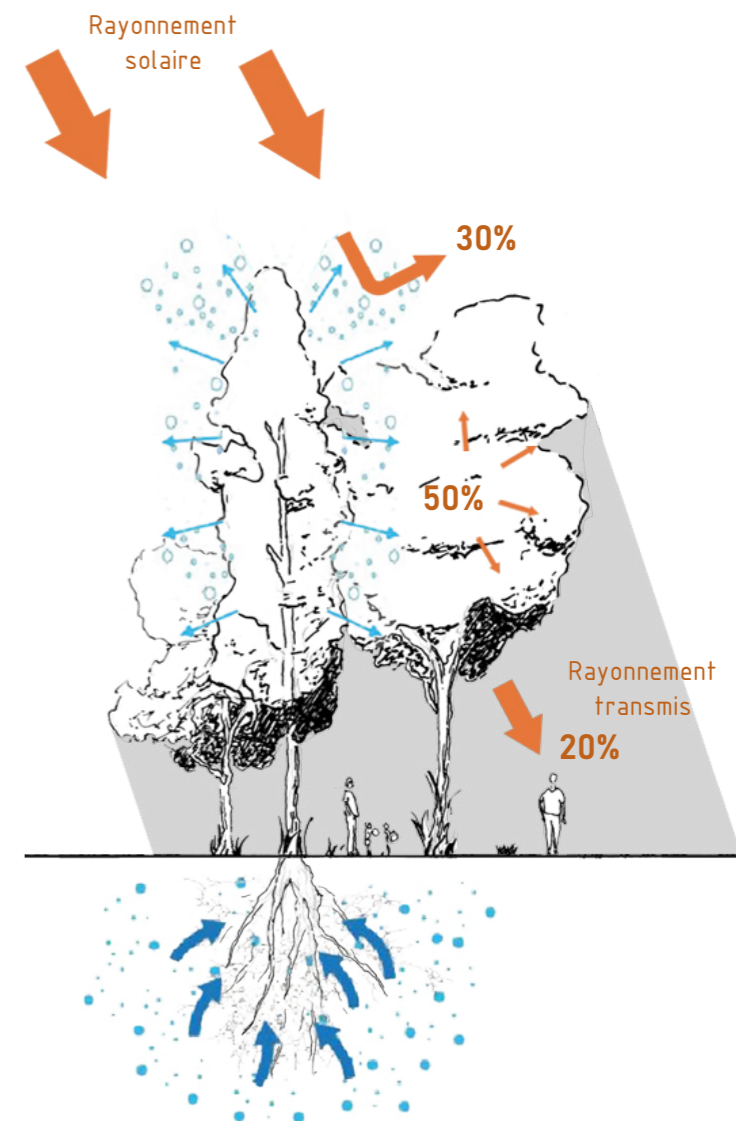
Comme nous le montre l'analyse de Valentin Guérineau en 2022, il est possible d'obtenir une différence de température allant jusqu'à moins 10 °C grâce à la présence de végétation.

Rafraîchissement des arbres par évapotranspiration, réflexion et absorption

Auteur : Production personnelle

Albédo des arbres dans un contexte urbain

Auteur : Production personnelle



## PUITS CANADIEN

Le puits canadien (ou puits provençal) est un dispositif passif qui utilise la géothermie pour refroidir des espaces intérieurs en été ou les réchauffer en hiver. Ce système repose sur la stabilité thermique du sol. Plus le sol est profond, moins la température de l'air influence celle de la terre. Un sol de plus en plus profond présente une température de plus en plus stable.

Deux principaux éléments influencent la température du sol. Le rayonnement solaire, qui chauffe directement la surface du sol pendant la journée et la teneur du sol en eau qui libère ou absorbe de la chaleur, ce qui peut refroidir ou réchauffer le sol, selon les conditions. Le transfert de chaleur de la température de l'air avec le sol est négligeable.

Le fonctionnement d'un puits canadien consiste à faire transiter de l'air extérieur dans un réseau de tuyaux enterrés (idéalement à plus de 2 mètres de profondeur). Lors de ce transit, des échanges thermiques par conduction (à travers les parois des tuyaux) et par convection (dans l'air en mouvement) permettent un transfert de chaleur entre l'air et le sol. L'air est ensuite dirigé vers les pièces intérieures du bâtiment.

En période estivale, l'air chaud est refroidi par le sol avant d'être envoyé dans le bâtiment. Par exemple, dans l'internat du lycée Voltaire à Orléans, un abaissement de température de 35 °C à 22 °C a été mesuré grâce à ce système.

En période hivernale, l'air froid est réchauffé par le sol, plus chaud. Ici, le flux thermique est inversé.

Il est nécessaire de prévoir un système de drainage pour évacuer les éventuels condensats et pour éviter que de l'eau ne stagne dans les conduits.

- Profondeur d'enfouissement : plus les conduites sont enterrées profondément, plus la température du sol est stable et favorable au déphasage thermique.
- Longueur du circuit : une conduite plus longue augmente le temps de contact air/sol, optimisant les transferts thermiques.
- Débit d'air : un débit modéré ( $\leq 2,5$  m/s) maximise les échanges thermiques en prolongeant le temps de séjour de l'air.
- Conductivité thermique du matériau des tuyaux : les matériaux à bonne conductivité (PVC notamment) facilitent les échanges.
- Nature du sol : La teneur en eau augmente de façon significative les performances. Le type de sol n'influe pas de manière importante la température de sortie

### Conductivité thermique des sols en fonction de leur teneur en eau

Source : thèse Hollmuller

### Température annuelle du sol

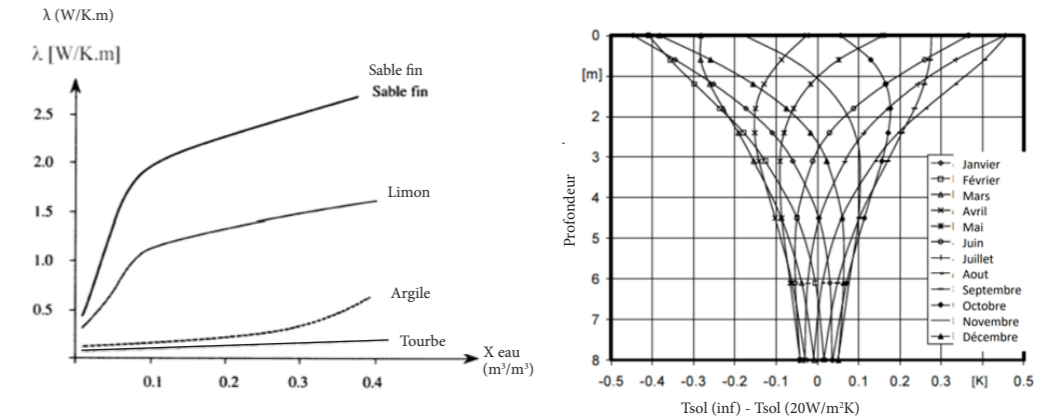
Source : B. Herzog, 2007

### Efficacité annuelle d'un puits canadien à 3 m de profondeur

Source : C. Mary, G. Cozian, 2016

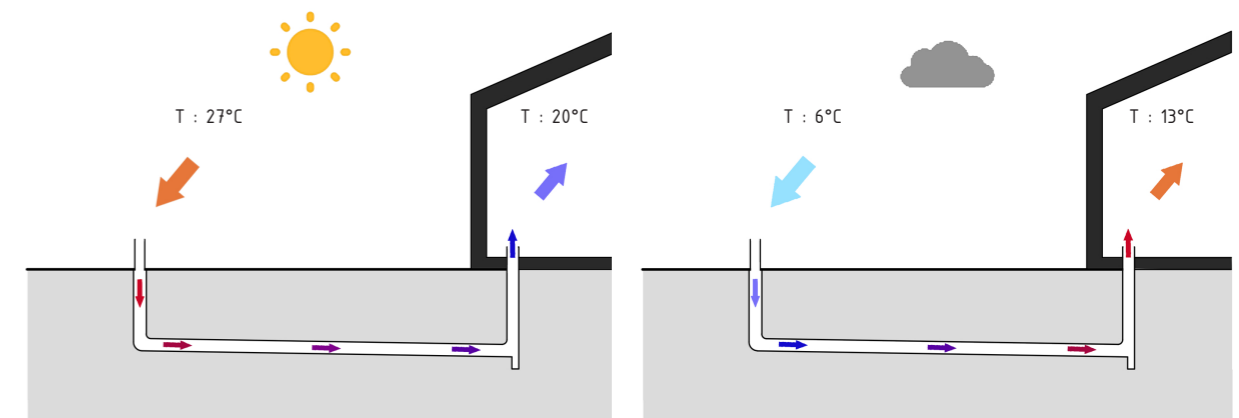
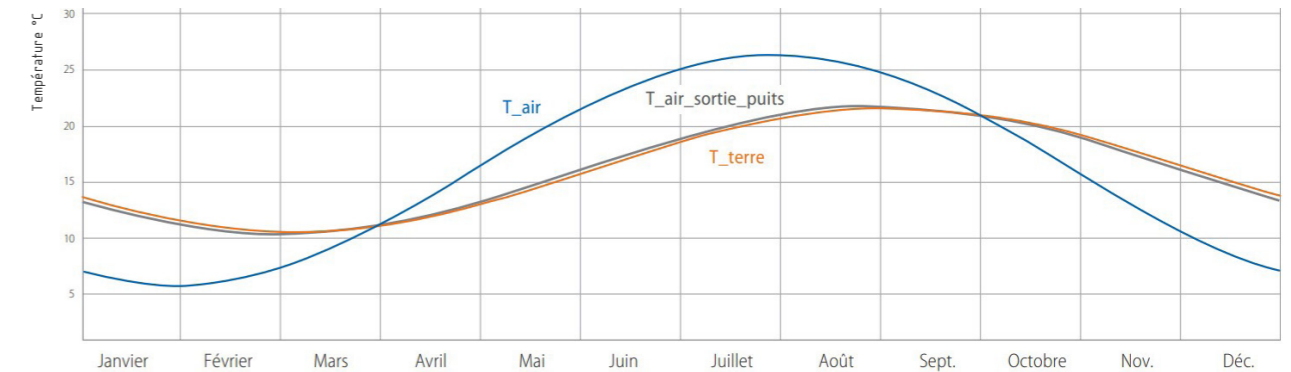
### Fonctionnement du puits canadien

Auteur : Production personnelle



[Le puits canadien / provençal, AeroDukto](#)

Herzog, 2007





## CHEMINEE SOLAIRE

La cheminée solaire est un dispositif architectural accolé ou superposé à un bâtiment, destiné à améliorer la ventilation naturelle grâce au principe de tirage thermique. Contrairement à une cheminée traditionnelle, qui fonctionne grâce à la différence de hauteur, la cheminée solaire optimise les flux d'air par le réchauffement solaire dans le conduit principal.

Le système repose sur la convection thermique. L'air chaud est un air dont les molécules se dilatent. Cette dilatation provoque une dépression qui attire l'air plus frais. C'est l'effet de tirage thermique qui aspire l'air intérieur du bâtiment vers l'intérieur de la cheminée.

Pour ce faire, l'air est chauffé dans le conduit de la cheminée grâce à une zone de captage solaire, souvent constituée d'une paroi vitrée orientée au sud, qui laisse pénétrer les rayons du soleil à l'intérieur du conduit. Ce dernier est conçu avec une section plus large que celle d'une cheminée classique, afin d'augmenter la surface d'absorption solaire et de favoriser le réchauffement de l'air. Une fois l'air chauffé, la différence de température entre l'intérieur du conduit et l'air ambiant dans le bâtiment crée un gradient de pression qui aspire l'air du bâtiment pour le diriger vers le conduit.

### Gradient de pression

« Le gradient de pression est une façon de décrire la différence de pression atmosphérique d'un endroit à un autre . On peut le considérer comme la variation de la pression atmosphérique (à une altitude ou un niveau donné dans l'atmosphère) lorsque l'on se déplace d'un endroit à un autre. »

PRESSURE GRADIENT, EQUATION AND FORMULA, STUDY  
N. Amendore

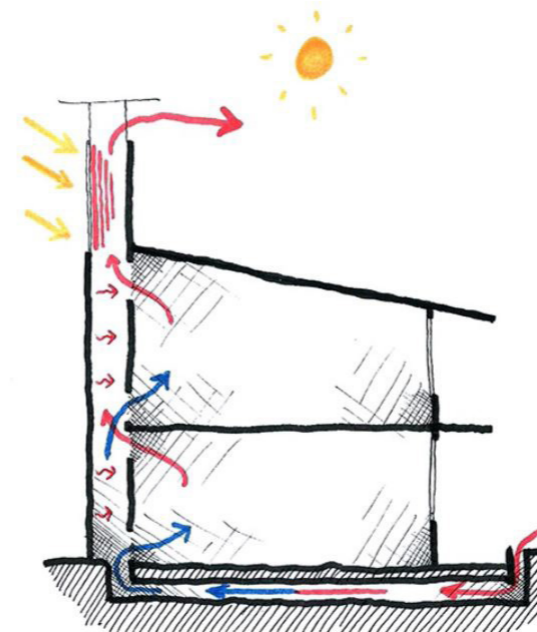
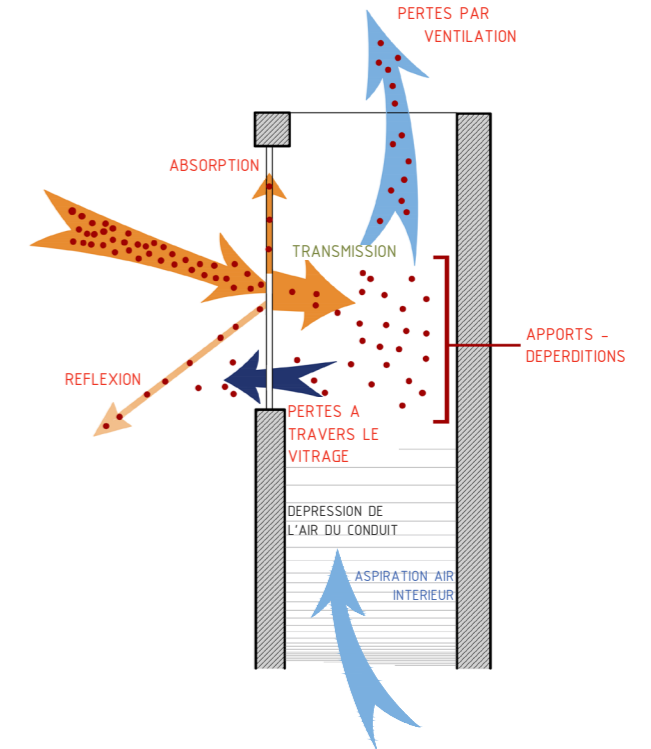
### Apport et déperdition énergétique pendant le fonctionnement d'une cheminée solaire

Auteur : Production personnelle

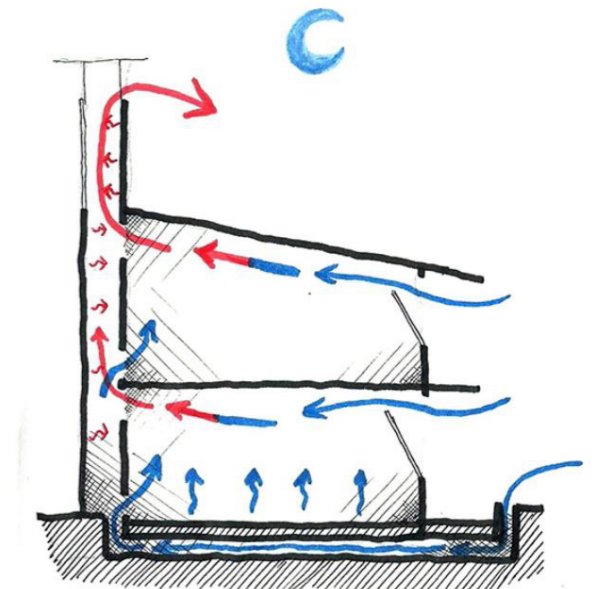
### Système de refroidissement par cheminée solaire du lycée Charles de Gaulle de Damas

Système de refroidissement par cheminée solaire du lycée Charles de Gaulle de Damas

Source : Une approche pluridisciplinaire des cheminées solaires, T. Monfort-Ginet, 2017



Ventilation en régime longue journée



Ventilation en régime de nuit, basé sur l'inertie de la cheminée

Plusieurs facteurs influencent l'efficacité de la cheminée solaire :

- Surface de captage : une grande surface augmente l'absorption d'énergie solaire mais entraîne aussi des pertes thermiques nocturnes par rayonnement et conduction, surtout lorsque la température extérieure est inférieure à celle du conduit.
- Choix des matériaux : les matériaux à forte inertie thermique (comme la brique ou le béton) permettent de stocker la chaleur solaire et de maintenir le tirage même après le coucher du soleil. Cela prolonge la ventilation au-delà des heures d'ensoleillement.
- Hauteur et géométrie du conduit : une cheminée plus haute renforce l'effet de tirage, conformément à la loi de Stack, qui définit la pression générée par la différence de température comme proportionnelle à la hauteur du conduit.
- Dispositifs de régulation : des trappes motorisées ou manuelles peuvent être intégrées pour activer ou désactiver la ventilation selon les besoins. Par exemple, elles peuvent être fermées en hiver pour éviter les pertes de chaleur ou ouvertes en été pour maximiser la ventilation.

Une approche pluridisciplinaire des cheminées solaires

N. Bansal, R. Mathur, M. Bhandari, 1993

Une approche pluridisciplinaire des cheminées solaires

T. Monfort-Ginet, 2017

# B Système de climatisation et de ventilation naturelle

## MASSE THERMIQUE

L'inertie thermique des matériaux utilisés dans le projet permet d'accumuler la chaleur pour la restituer progressivement dans le temps. Le bâtiment tire parti de cette masse thermique afin de limiter l'impact de la température extérieure et du rayonnement solaire sur les parois.

Comme nous le montre la simulation Forma, l'énergie transmise au cours d'une année sur les parois est environ de 1400kWh/m<sup>2</sup> et dépasse les 1800kWh/m<sup>2</sup> sur la toiture.

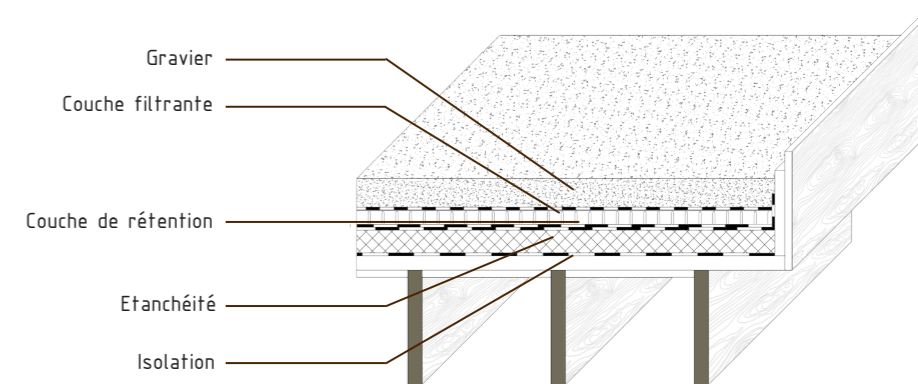
C'est pourquoi l'enveloppe extérieure du bâtiment est réalisée en pierre. Ce matériau local présente une très forte inertie thermique. La pierre est particulièrement efficace pour absorber, stocker et restituer lentement la chaleur. Pour optimiser cet effet, les parois ont une épaisseur de 80 cm. Cela permet d'augmenter le déphasage thermique et de réduire significativement la transmission de chaleur vers l'intérieur grâce à un fort amortissement.

## Composition de la toiture

Auteur : Production personnelle

## Différents niveaux de la cour

Source : Forma Autodesk



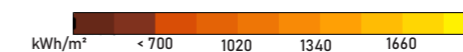
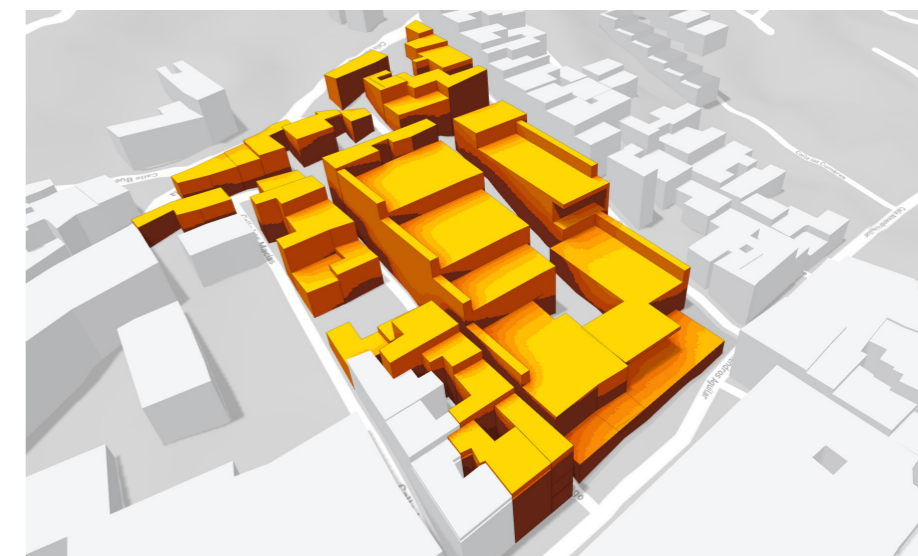
## Albédo des matériaux de construction

Source : MATÉRIAUX, Bordeaux Métropole

## Murs massifs en pierre

Auteur : Production personnelle

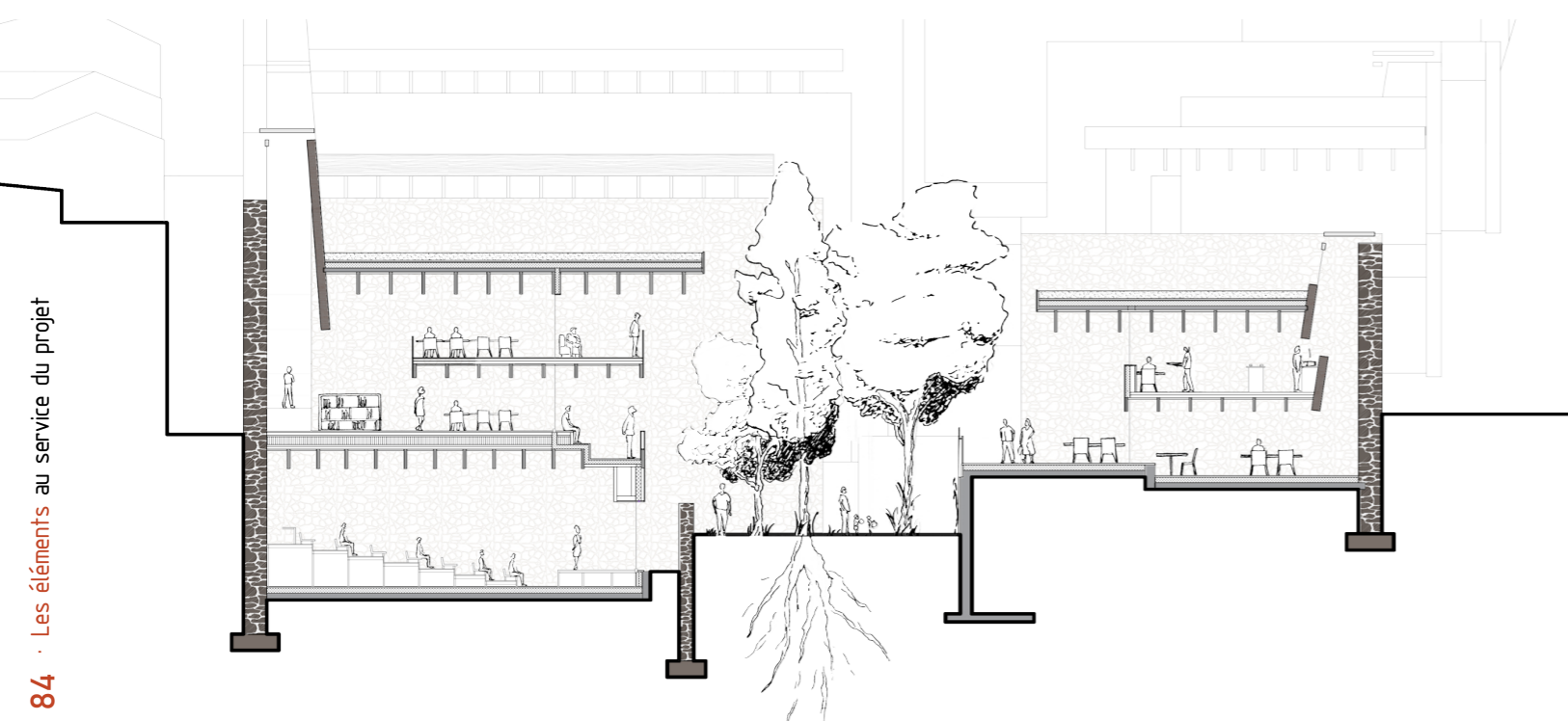
Matériau	Albédo
membrane blanche (PVC, PTO, EPDM blanc)	0,7 - 0,85
Gravier clair	0,3 - 0,5
Tuile de terres cuites (clair)	0,3 - 0,4
Bois	0,2 - 0,3
Toiture végétalisée	0,3 - 0,5
Ardoise naturelle	0,1 - 0,25
Tuile de terre cuite foncée	0,1 - 0,2
Gravier foncé	0,2 - 0,3
Bitume	0,05 - 0,2



Forma Autodesk

De la même manière, la toiture nécessite une grande masse thermique puisqu'elle est la surface la plus exposée au rayonnement solaire. Elle est donc recouverte d'une couche de gravier blanc de 25cm d'épaisseur.

Ce gravier possède un albédo d'environ 0,5, ce qui signifie qu'il réfléchit 50% du rayonnement solaire reçu. De plus, le gravier confère une grande inertie thermique à la toiture. Associé à une lame d'air située par-dessous, il constitue une protection thermique efficace qui limite le réchauffement intérieur par le plafond.



Les espaces intérieurs sont séparés par de grands murs orientés vers les jardins. Ces murs sont construits alternativement en pisé et en pierre, deux matériaux à forte inertie thermique, qui contribuent également à limiter l'augmentation de température à l'intérieur.

Ici, la stratégie est différente. L'objectif est de ventiler l'ensemble du bâtiment pendant la nuit afin de baisser la température de l'air au maximum. Cela permet également de rafraîchir la température des murs massifs. Ainsi, en journée, les murs, se réchauffant plus lentement que l'air grâce à leur masse thermique, restent plus frais que l'air ambiant. Par convection, ils contribuent à ralentir l'échauffement de l'air intérieur et participent à maintenir une ambiance plus fraîche pendant le jour.

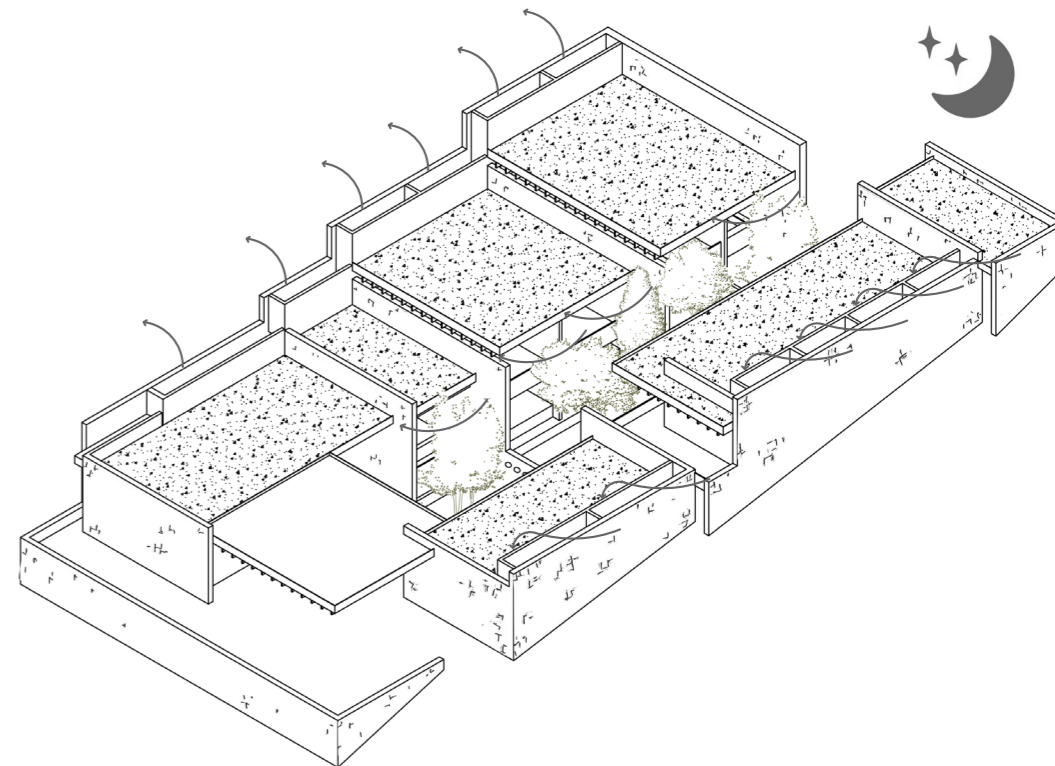


### Ventilation des espaces intérieurs la nuit

Auteur : Production personnelle

### Refroidissement par convection le jour

Auteur : Production personnelle

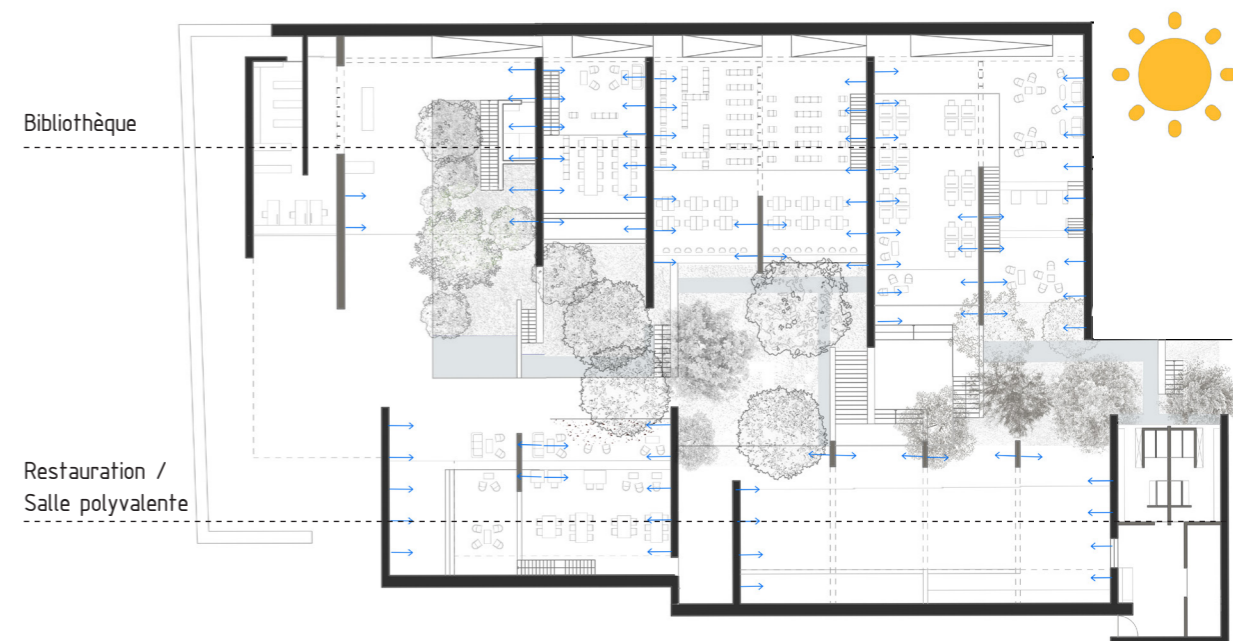


### Refroidissement par convection dans la bibliothèque

Auteur : production personnelle

### Refroidissement par convection dans la cafétéria / salle polyvalente

Auteur : Production personnelle



## COURTYARD EFFECT

L'implantation du projet s'organise autour d'un jardin public longitudinal orienté Est-Ouest. Ce jardin, relativement étroit dans l'axe Nord-Sud, est constitué de plusieurs petits jardins suspendus, assimilables à des cours intérieures. Tous ces espaces sont ouverts sur le côté Est, donnant sur d'autres cours, situées légèrement en contrebas.

Cette configuration, étroite dans l'axe Nord-Sud mais très allongée dans l'autre, permet d'avoir des espaces extérieurs sur toute la longueur du projet tout en limitant la pénétration directe des rayons solaires. La hauteur importante des volumes bâtis qui entourent le jardin renforce cet effet, avec un rapport Hauteur : Largeur favorable à l'ombrage.

En restant majoritairement à l'ombre, la cour centrale favorise une circulation naturelle de l'air.

En effet, l'air chaud est évacué par le haut, ce qui permet le renouvellement de l'air ambiant par de l'air plus frais, bénéfique à la fois pour les cours et pour les pièces adjacentes.

L'articulation de ces éléments permet de créer des jardins suspendus naturellement protégés, de limiter l'échauffement des surfaces par le soleil, et d'éviter l'accumulation de chaleur dans l'air ambiant.

## Trajectoire du soleil

Source : Sun earth tools

## Différents niveaux de la cour

Auteur : Production personnelle

## Morphologie de la cour intérieure

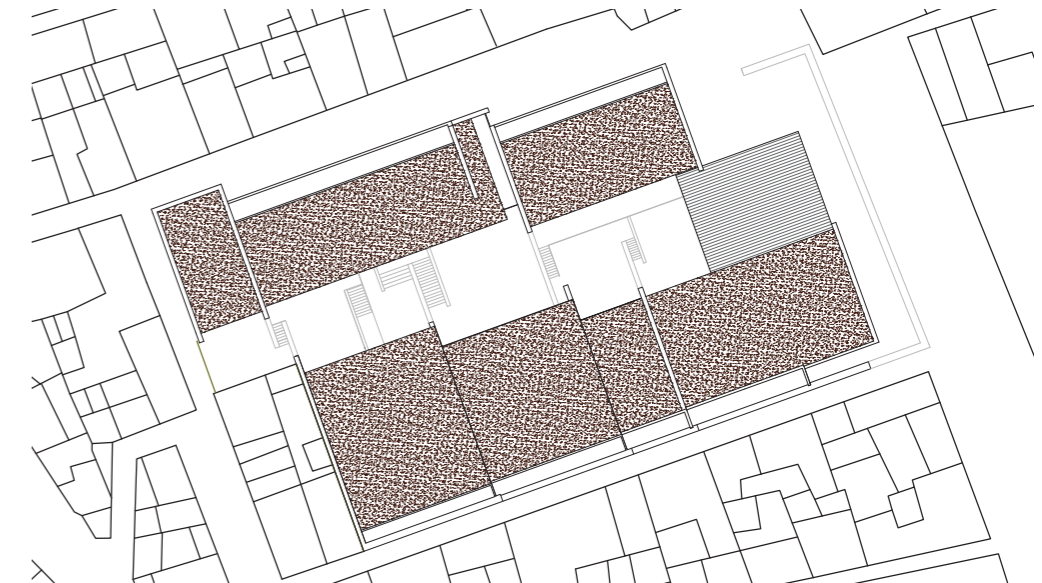
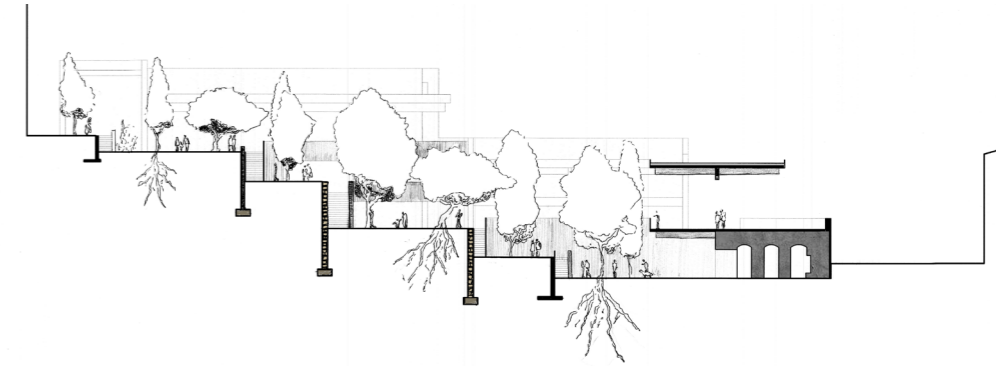
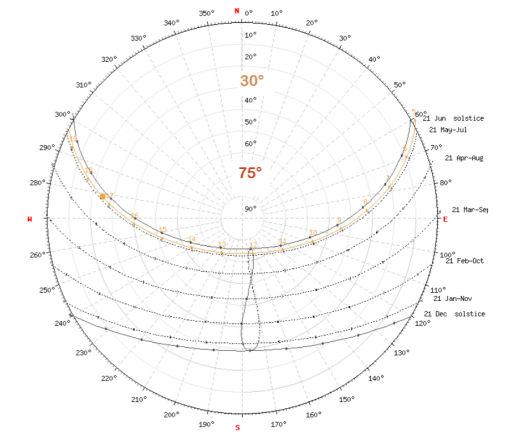
Auteur : Production personnelle

## Ombre dans le projet le 15 juillet

Auteur : Production personnelle

21 décembre

15 juillet



La faille végétale est parcourue par un chemin d'eau qui serpente le long des jardins. La présence continue de l'eau tout au long du projet permet de rafraîchir encore plus l'air ambiant dans la faille grâce à l'évaporation.

L'eau s'écoule de jardin en jardin, en longeant les murs de soutènement en pierre qui les séparent. Cette circulation verticale crée un effet de cascade pour atteindre le bassin en dessous. Ce mouvement dynamique favorise une évaporation plus efficace que celle de l'eau stagnante, puisque la formation de fines gouttelettes augmentent les échanges thermiques avec l'air.

Récupérer l'eau de pluie

Guide de bâtiment durable, Bruxelles environnement

Les bassins sont reliés en circuit fermé. Lorsque l'eau atteint le dernier bassin, situé au pied du refuge anti-aérien, elle est récupérée et stockée dans une cuve enterrée par un système de pompe. L'eau est ensuite redirigée de la cuve vers le bassin du jardin le plus haut, afin de créer un ruissellement continu dans toute la faille.

Chemin de l'eau dans le jardin ▷

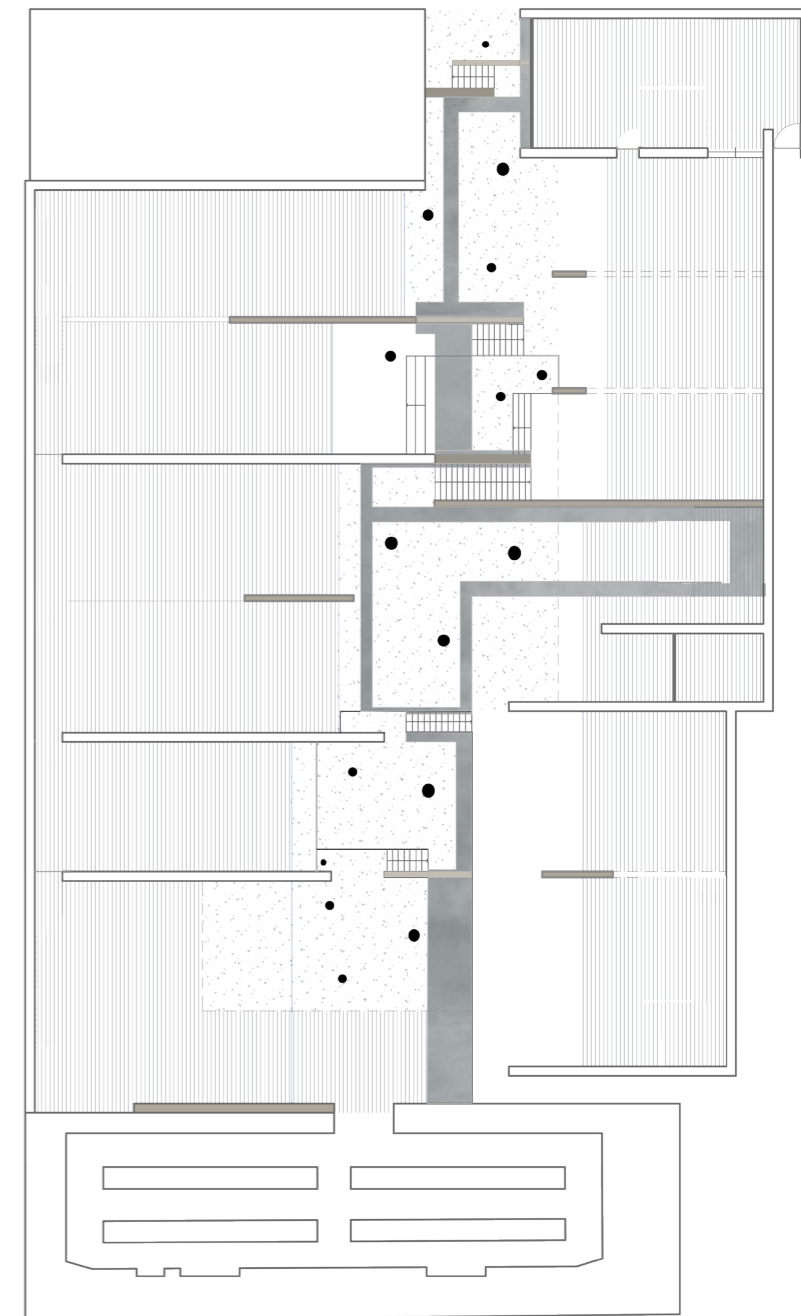
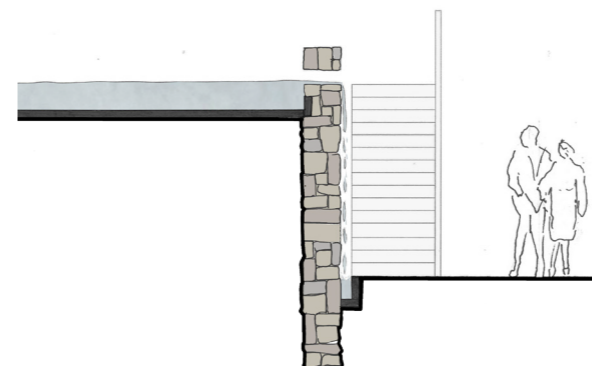
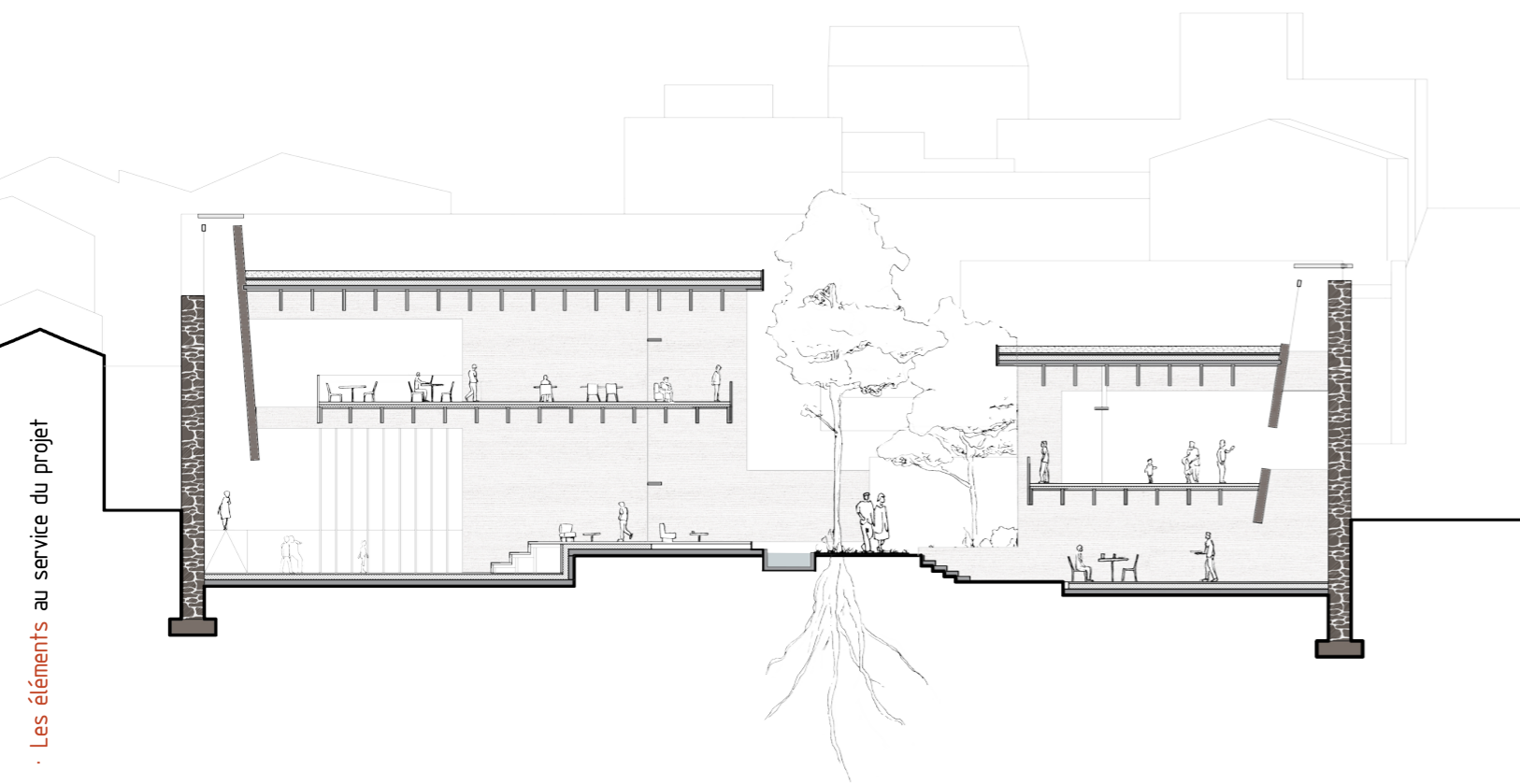
Auteur : Production personnelle

Écoulement de l'eau d'un niveau en dessous ▽

Auteur : Production personnelle

▽ Bassin d'eau dans le jardin

Auteur : Production personnelle



On considère les toitures en gravier comme des toitures stockantes. Grâce à sa grande masse et à la nature du gravier, elle présente un fort pouvoir de rétention temporaire de l'eau, facilitant le ruissellement vers les points de collecte.

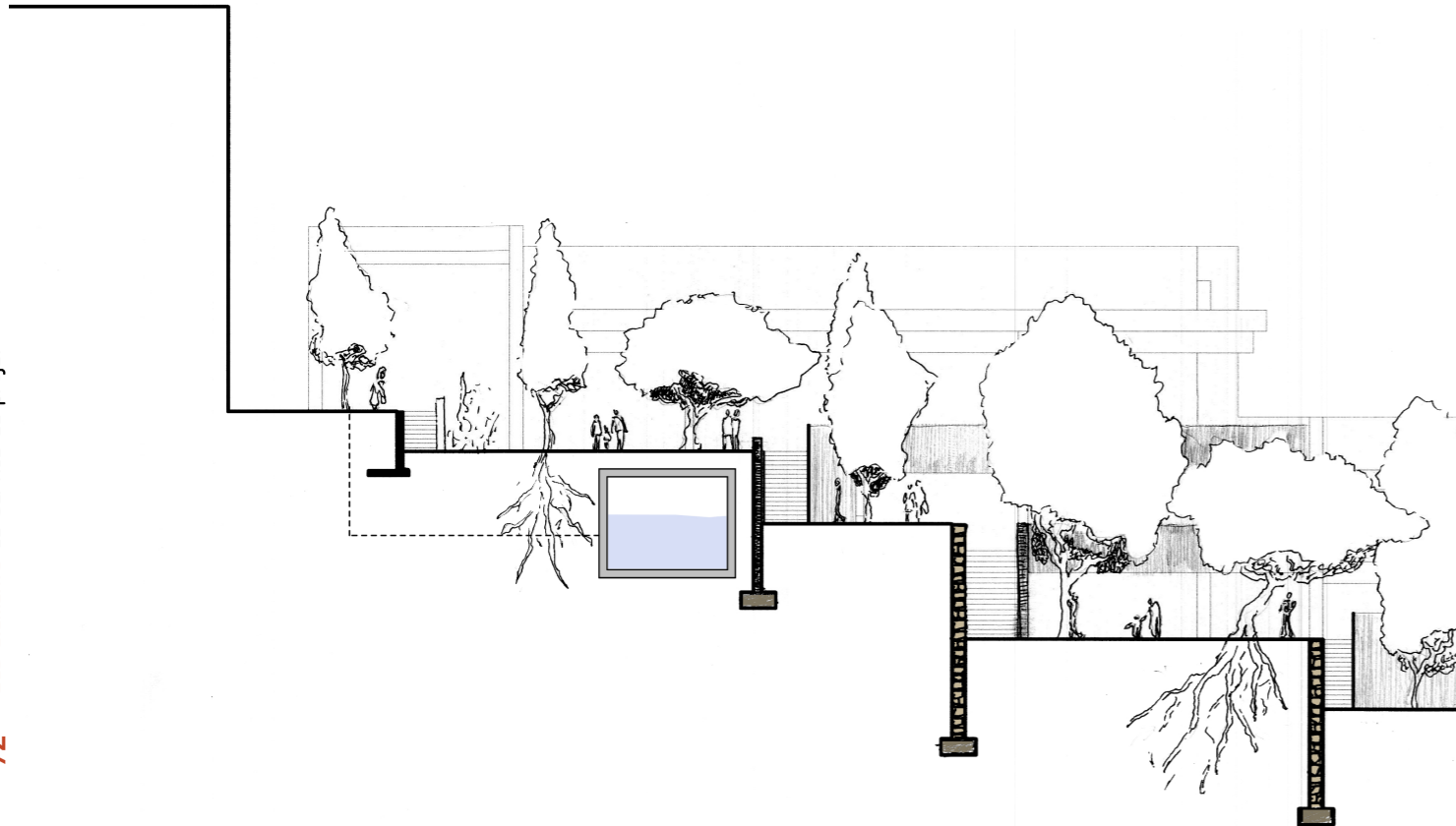
Lors des épisodes de pluie, l'eau est captée à la surface de la toiture, puis dirigée vers une cuve de stockage enterrée. Cette eau est ensuite utilisée pour alimenter les bassins du jardin, assurant un fonctionnement tout au long de l'année.

La cuve enterrée permet à l'eau stockée de maintenir une température stable, limite le développement des algues et préserve la qualité de l'eau dans le temps. Il peut être judicieux de diffuser des fines bulles dans la cuve pour oxygéner et éviter la stagnation de l'eau.

Comme on le voit sur le graphique des précipitations à Jaén, il pleut environ 289 mm d'eau par an. Etant donné que la surface des toitures est de 1850 m<sup>2</sup>, on peut espérer un volume d'environ 535 m<sup>3</sup> d'eau récolté par an.

Récupérateur d'eau de pluie

Rewatec



Récupérer l'eau de pluie

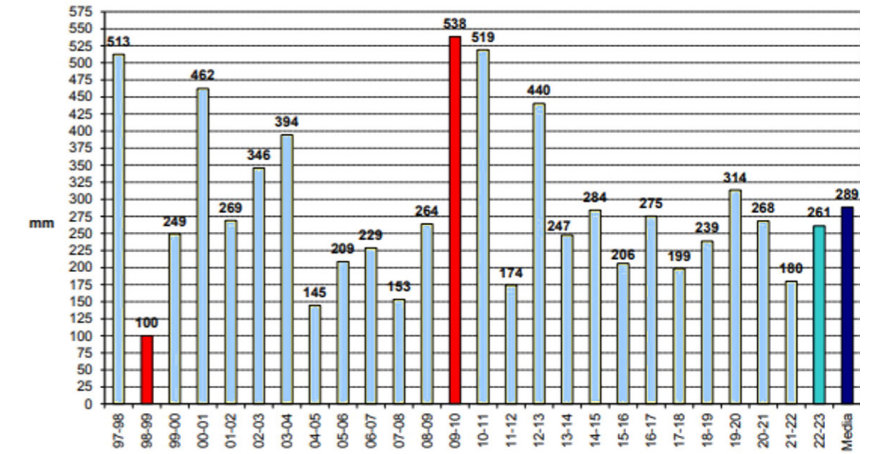
Guide de bâtiment durable,  
Bruxelles environnement

Précipitation moyenne par année à Jaén

Source : asajajaen, pluviometria

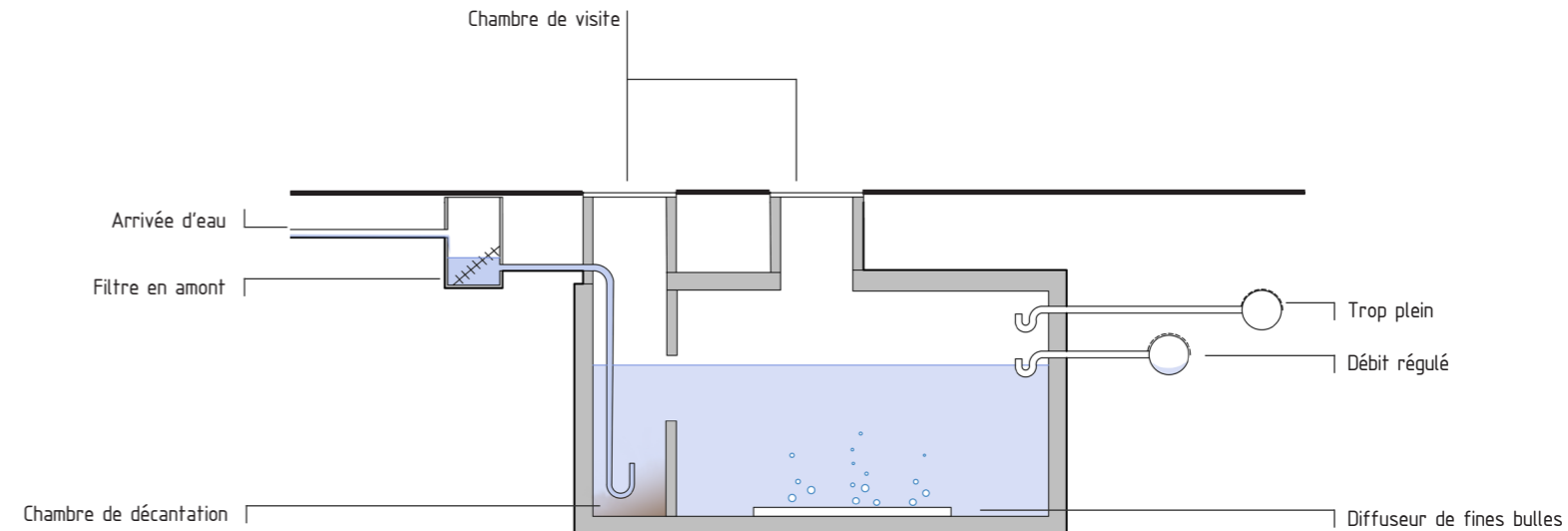
Cuve de stockage de l'eau

Auteur : Production personnelle



Emplacement de la cuve dans le projet

Auteur : Production personnelle





## VEGETATION

La cour intérieure est densément plantée d'arbres et de végétation, faisant de cette faille le poumon vert du projet. Les végétaux y jouent un rôle essentiel. Ils réduisent l'exposition au rayonnement solaire, rafraichissent l'air ambiant et améliorent le confort thermique des espaces alentours.

Les grands arbres sont particulièrement efficaces grâce à leur houppier, la partie haute composée des branches et du feuillage. Cette masse végétale forme un canopée dans la faille, comparable à une toiture filtrante, qui bloque en partie les rayons du soleil :

30% du rayonnement est réfléchi par le feuillage supérieur.  
50% des rayons sont absorbés par le feuillage.

Ce filtre végétal laisse passer une lumière diffuse tout en limitant fortement l'apport thermique, ce qui participe à éviter la surchauffe dans la cour.

### Classement des espèces en fonction de leur consommation en eau

Source : Etudes en agroforesterie écophysologie sur la consommation d'eau des arbres, FAO, INRAE

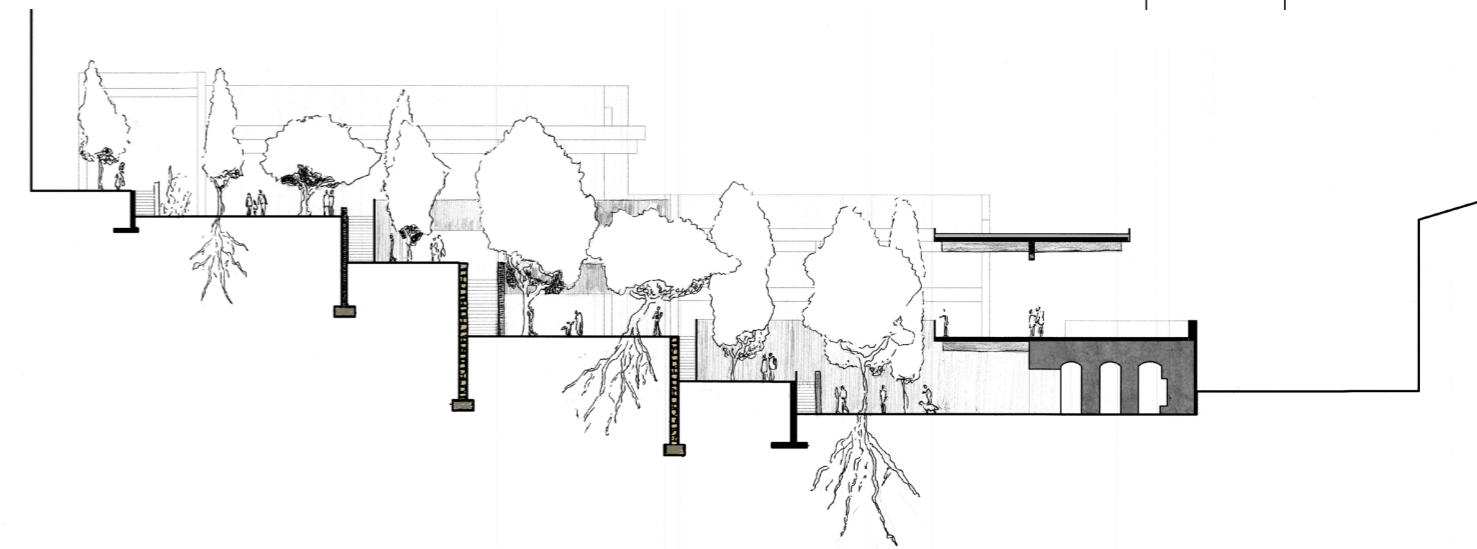
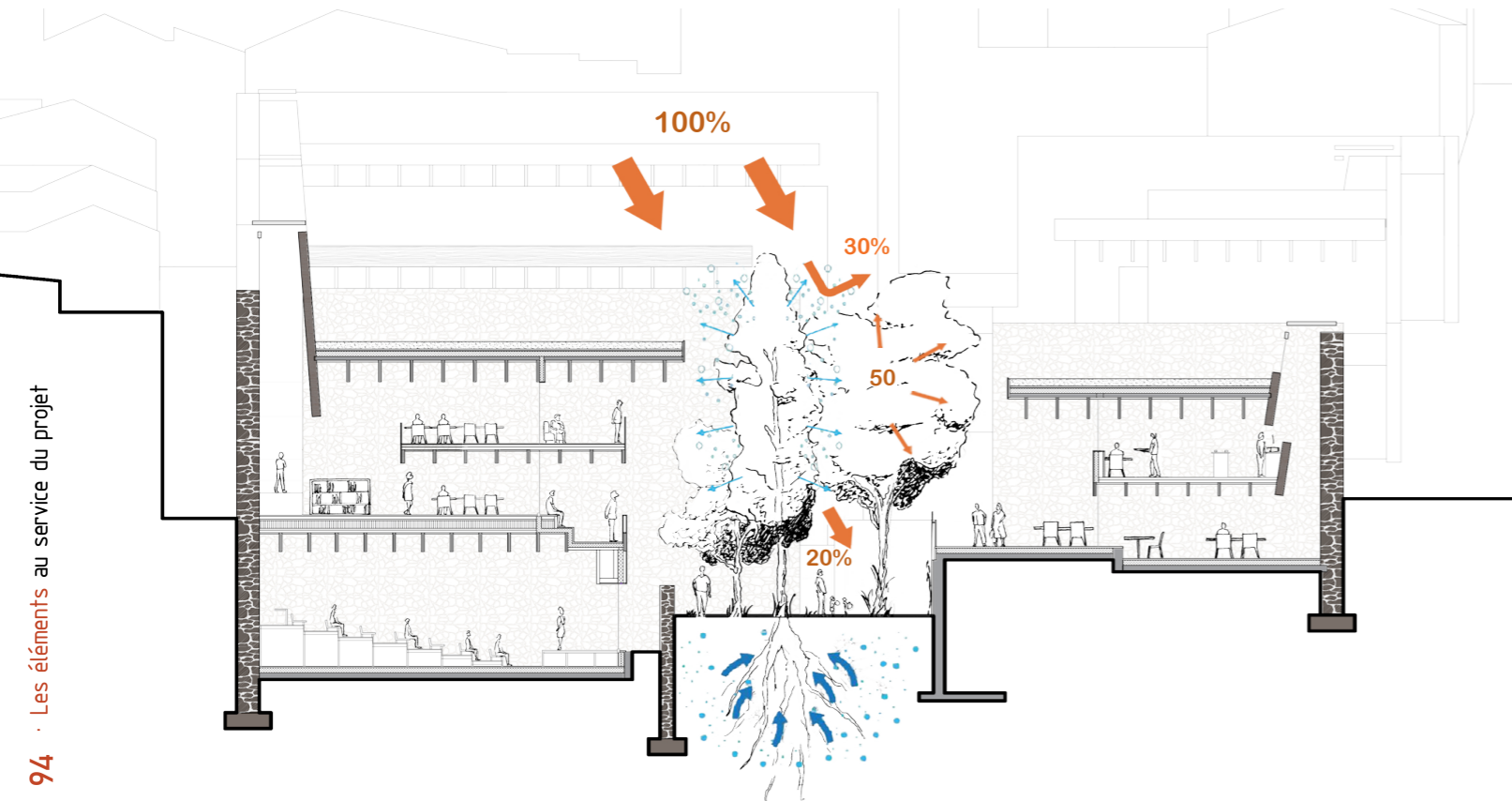
### Jardin du projet

Auteur : Production personnelle

### Protection solaire et évapotranspiration des végétaux

Auteur : Production personnelle

Espèce	Besoin en eau (L/m/semaine)	Quantité évapotranspiration (L/jour)
Olivier	5 - 10	2 - 5
Chêne vert	5 - 12	5 - 8
Caroubier	6 - 12	3 - 7
Pinus pinea	8 - 15	6 - 9
Sophora	15 - 25	7 - 15
Albiza	15 - 30	10 - 20
Frêne	20 - 35	20 - 40
Saule pleureur	50 - 100	50 - 100
Peuplier noir	80 - 120	70 - 200



Les arbres participent au rafraichissement de l'air grâce à l'évapotranspiration. L'eau prélevée dans le sol est rejetée dans l'atmosphère par les feuilles, refroidissant l'air ambiant naturellement.

Pour être efficace, il est important de sélectionner des essences végétales adaptées au climat. C'est-à-dire des arbres à la fois résistants à la sécheresse estivale et capable de maintenir une évapotranspiration suffisamment élevée pour qu'elle se fasse ressentir.

Pour climatiser les espaces intérieurs du refuge, un réseau de puits canadiens est disposé sous l'ensemble de la surface du projet. Chaque puits canadien se compose d'une entrée d'air, d'un conduit enterré sous au moins deux mètres de profondeur, et d'une bouche de sortie intégrée dans les espaces intérieurs.

Pour optimiser leur efficacité, les prises d'air sont situées au niveau des jardins, qui bénéficient d'un microclimat plus frais que la température extérieure grâce au courtyard effect, à la végétation et à l'évaporation de l'eau.

Ainsi, l'air aspiré dans les conduits bénéficie déjà d'une température modérée avant même d'entamer son parcours. En plus de cela, l'air est capté à travers les murs de soutènement, juste derrière les petites cascades qui permettent à l'eau de descendre d'un bassin à un autre.

Cette prise d'air à proximité immédiate de l'eau accentue le rafraîchissement de l'air, qui est légèrement refroidi avant de pénétrer dans les conduits.

Réseau de puits canadiens ▸  
sous le projet

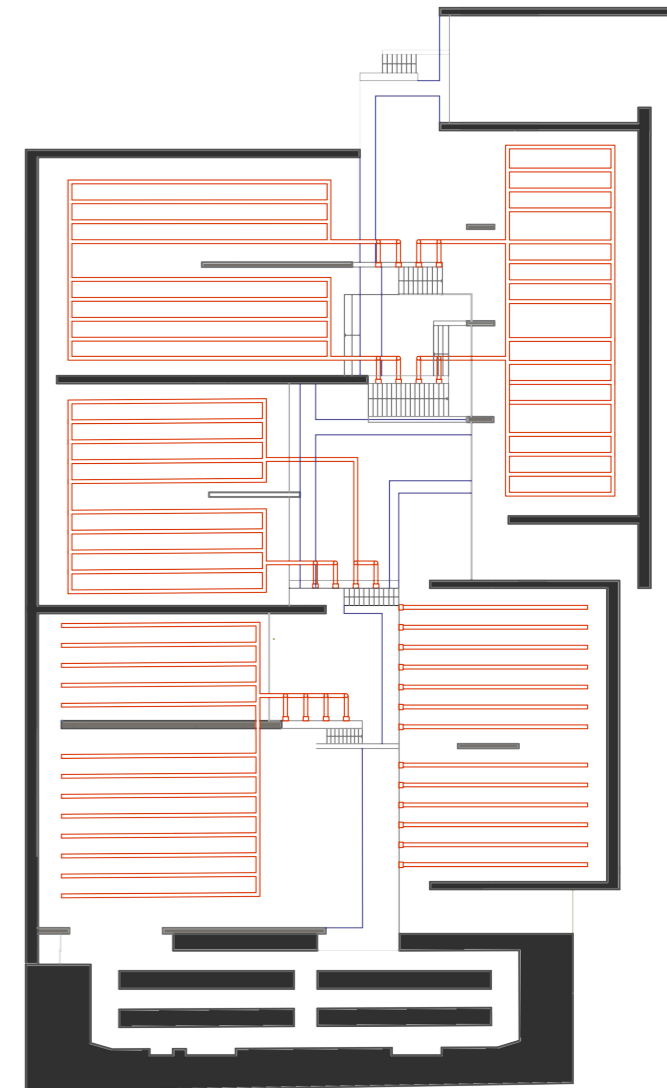
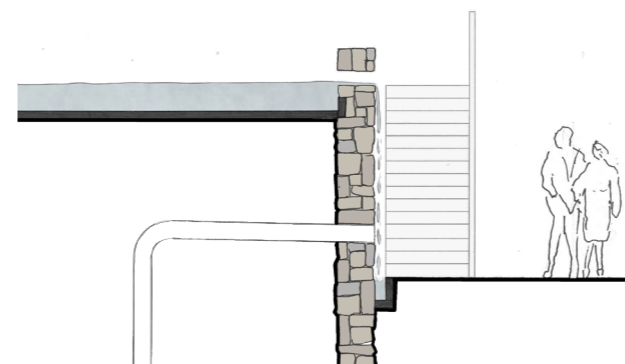
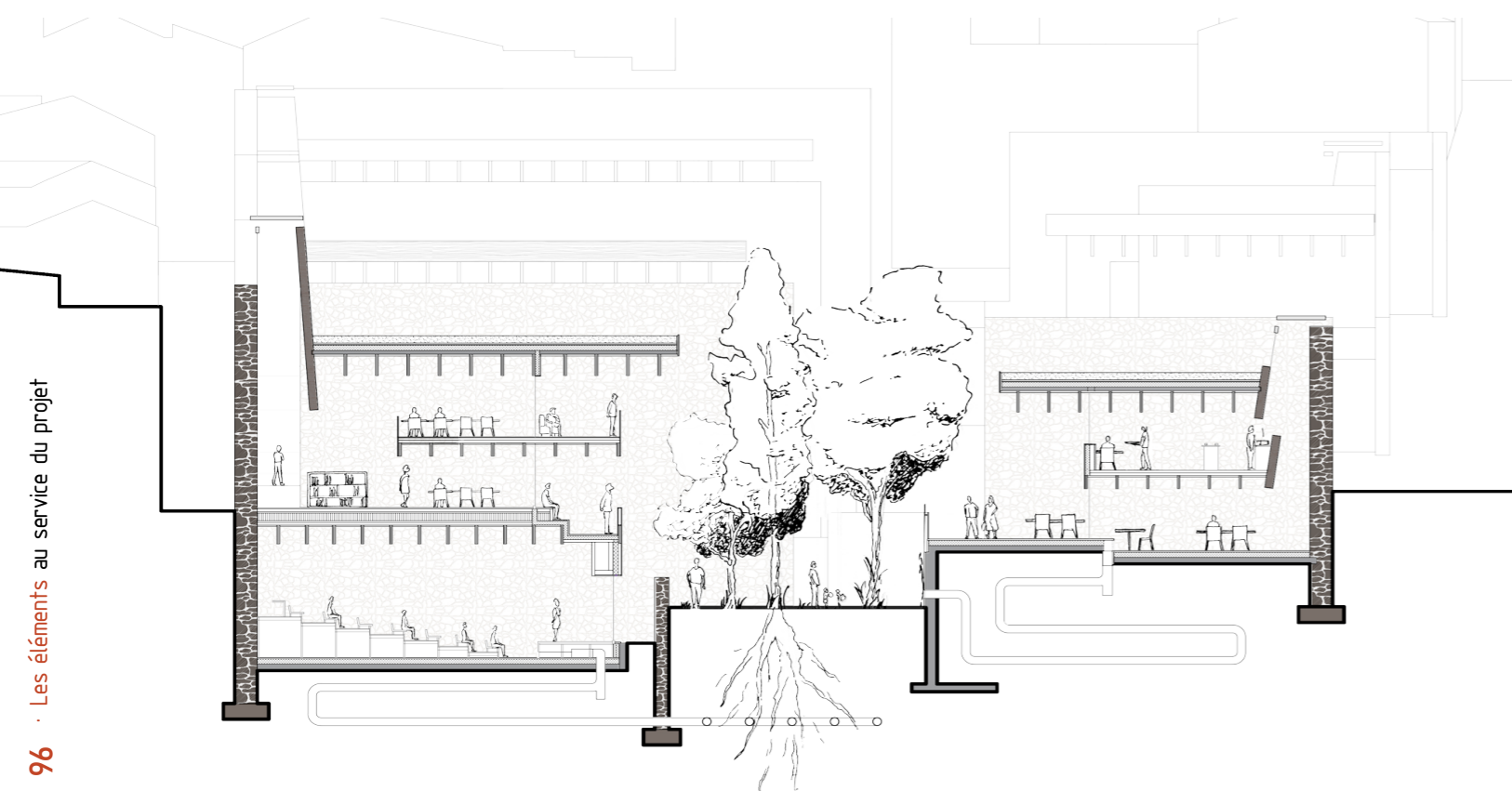
Auteur : Production personnelle

Entrée d'air à travers le mur d'eau ▾

Auteur : Production personnelle

▽ Intégration des aérations dans le projet

Auteur : Production personnelle



Chaque réseau est équipé d'un système de drainage et d'un regard de visite pour éviter toute stagnation dans les tuyaux et faciliter l'entretien.

Les conduits serpentent sous les constructions sur environ trente mètres, de façon à assurer un échange thermique suffisant avec le sol. L'air refroidi par son parcours souterrain ressort par des bouches intégrées au mobilier intérieur dans chaque pièce.

Un dispositif de ventilation basse consommation peut être utilisé pour garantir la bonne circulation de l'air entre l'extérieur et l'intérieur des réseaux.



## CHEMINEE SOLAIRE

Des cheminées solaires sont intégrées aux deux extrémités du bâtiment. Elles sont positionnées sur toute la longueur du projet de manière à permettre une ventilation naturelle.

Le fonctionnement de cette ventilation repose sur le réchauffement de l'air par rayonnement solaire. Les rayons du soleil pénètrent à travers des vitres orientées au sud (zone de captage) et viennent frapper les parois du conduit. Ces parois sont réalisées en pierre ou en terre crue, deux matériaux à forte inertie thermique, qui permettent d'accumuler de la chaleur afin de réchauffer l'air présent dans le conduit.

L'air chaud, plus léger, s'élève naturellement dans le conduit, créant un effet de tirage. Ce mouvement ascendant aspire en continu de l'air frais provenant de la faille végétale, qui bénéficie d'un microclimat tempéré. L'air extérieur traverse ainsi le bâtiment, rafraîchit les espaces intérieurs, puis est évacué par la partie haute des cheminées.

### Effet des cheminées solaires ▷

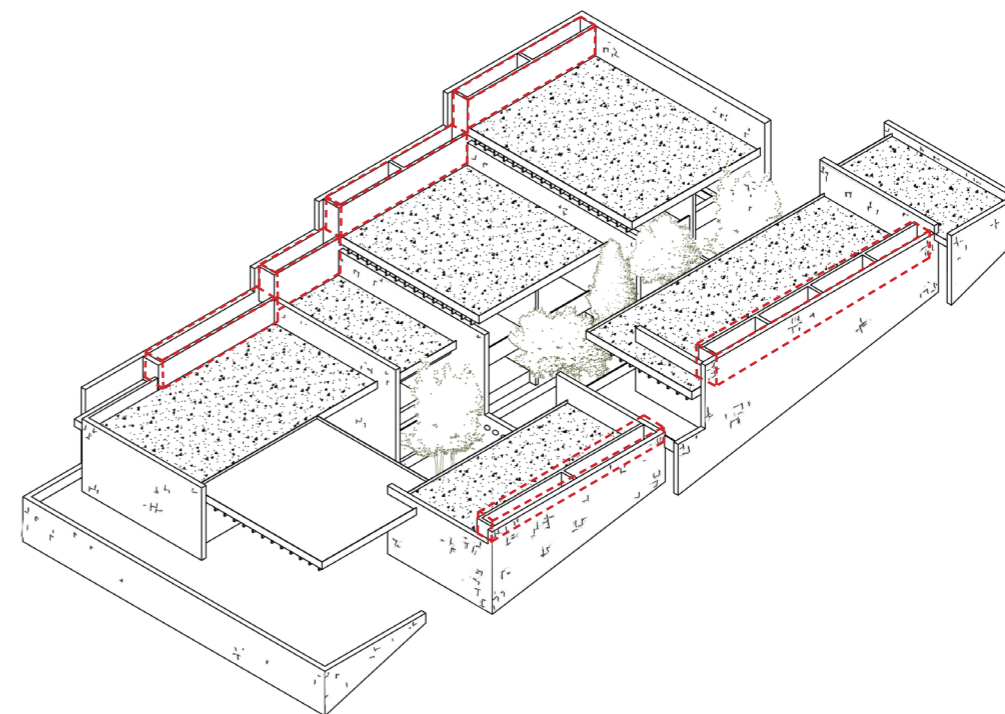
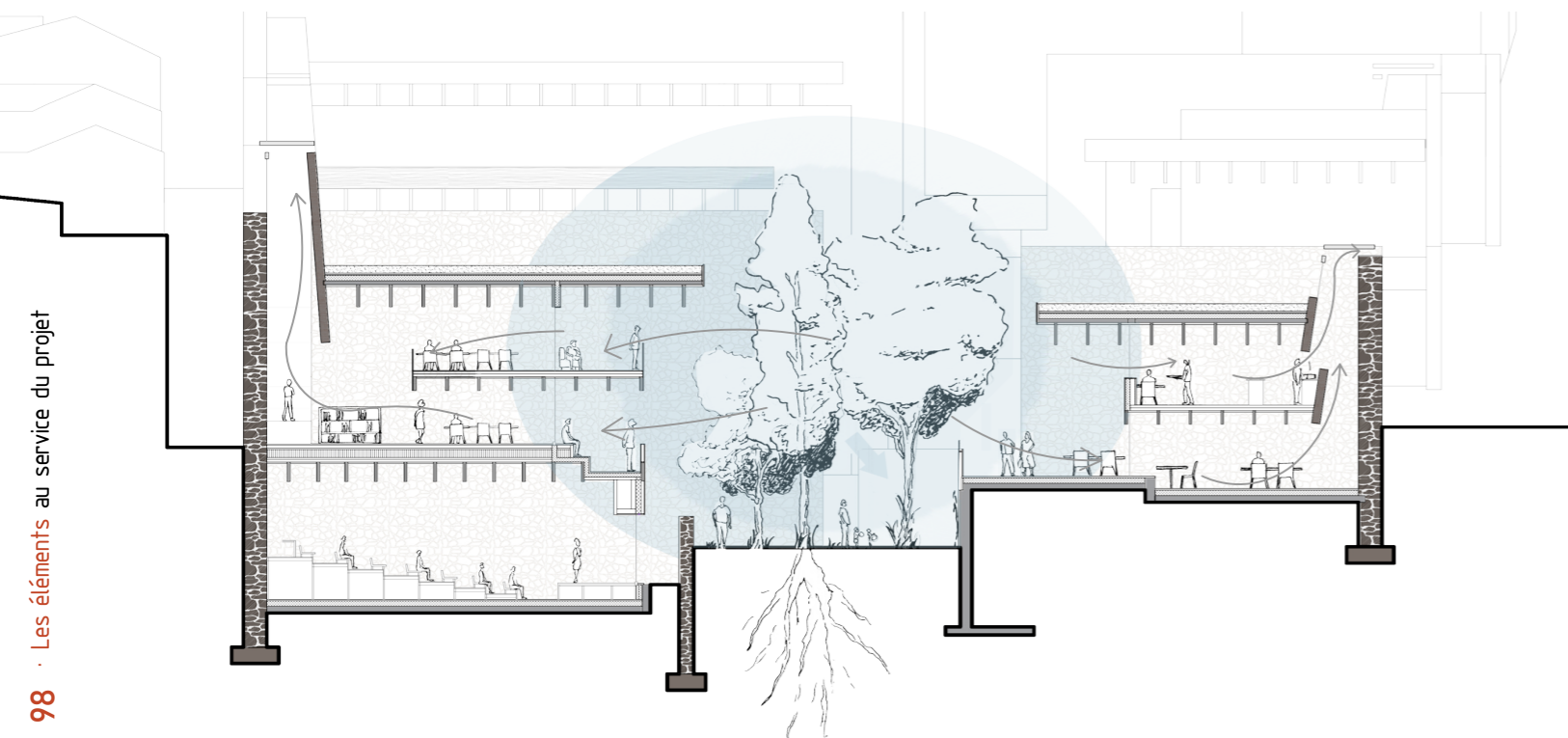
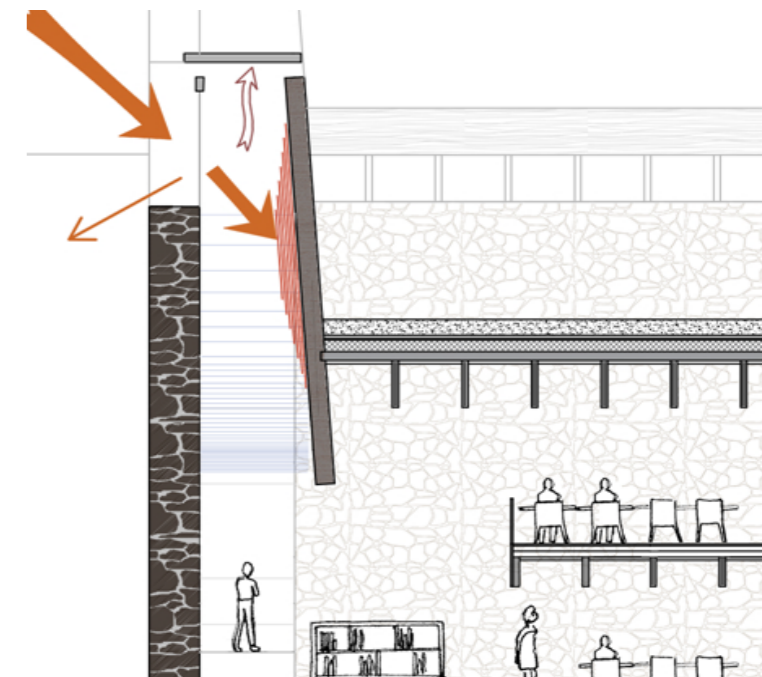
Auteur : Production personnelle

### Emplacement des cheminées solaires dans le projet ▽

Auteur : Production personnelle

### ▽ Ventilation du jardin vers les cheminées solaires

Auteur : Production personnelle



Lorsqu'un excès de nébulosité réduit le rayonnement solaire et donc l'efficacité des cheminées solaires, la ventilation naturelle du bâtiment peut être assurée grâce au vent.

Dans la vieille ville de Jaén, le vent dominant vient du nord-ouest. Ce flux d'air peut être exploité en adaptant le fonctionnement des cheminées solaires, qui deviennent alors des conduits de captation du vent surplombant la ville.

Dans ce cas de figure, un clapet ferme partiellement la trappe de la cheminée nord afin de bloquer le flux d'air ascendant. L'air est ainsi dévié dans le conduit, puis traverse le bâtiment avant de s'échapper naturellement par la cheminée sud. Cette aspiration dans le conduit sud est renforcée par l'effet de tirage induit par la différence de pression entre l'air intérieur et l'air au-dessus de la cheminée.

Le même scénario est possible en inversant les clapets si le vent provient du sud.

### Disposition de la trappe en fonction des besoins de ventilation

Auteur : Production personnelle

### Direction du vent sur site

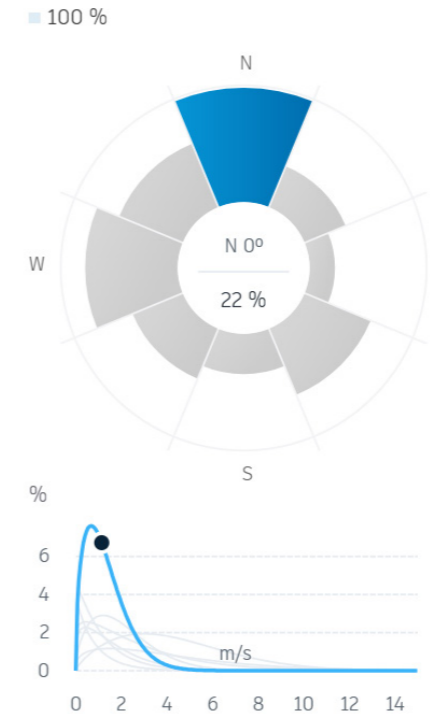
Source : Forma Autodesk

### Captation du vent dans le projet

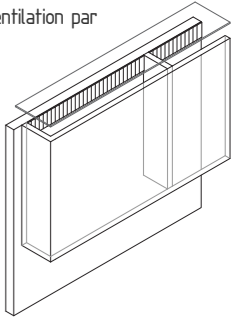
Auteur : Production personnelle

### Système de ventilation par captation du vent dans les Badgirs iraniens

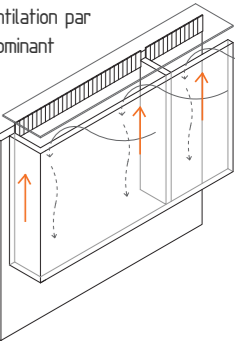
Source : Une approche pluridisciplinaire des cheminées solaires, T. Monfort-Ginet, 2017



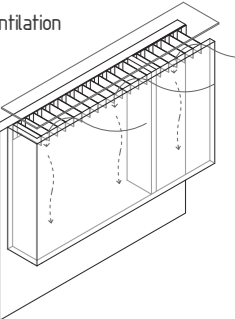
Clapets ouverts : ventilation par le soleil



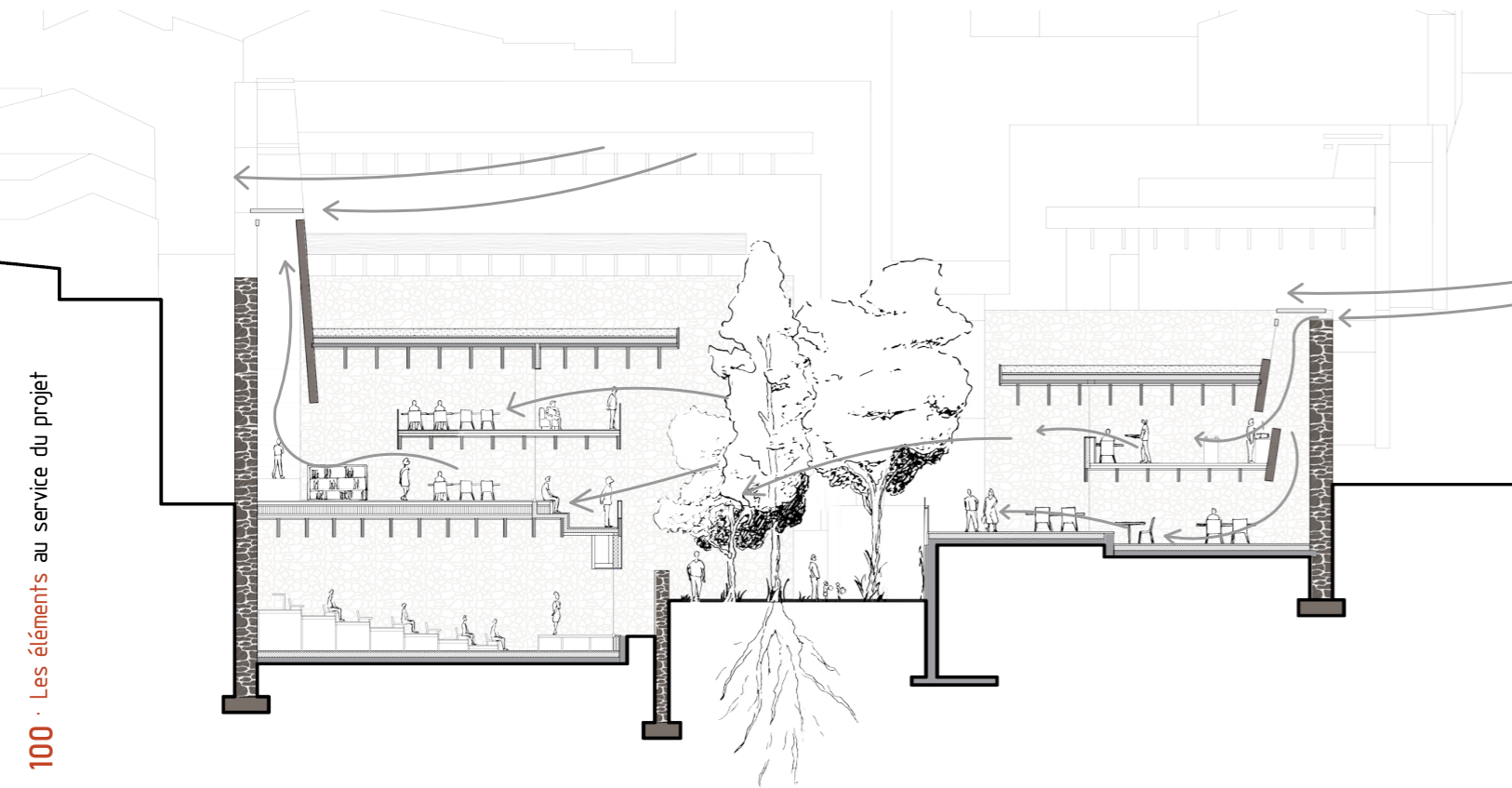
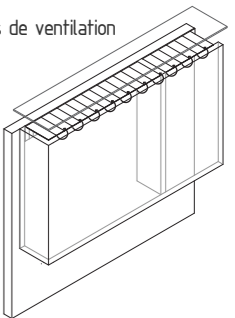
Clapets fermés : ventilation par captation du vent dominant



Trappe ouverte : ventilation



Trappe fermée : pas de ventilation



# C Confort thermique

## Confort thermique

« Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement. »

CONFORT THERMIQUE, FICHE TECHNIQUE, AGENCE NATIONALE DE L'HABITAT

### Confort thermique dans les lieux de vie

M. Le Guay, Fondation EFB,

Le confort thermique optimal correspond à une situation dans laquelle le corps humain n'est soumis à aucune contrainte thermique significative de la part de son environnement. Ainsi, les mécanismes thermorégulateurs qui permettent de garder la température du corps stable (36,5°C chez l'humain) peuvent réguler la température du corps sans sollicitations excessives. L'organisme parvient alors à maintenir sa température interne, sans avoir besoin d'effort supplémentaire pour compenser des potentiels variations extérieures. C'est ce qu'on appelle « l'équilibre thermique » entre un corps et son environnement.

## Equilibre thermique

« La puissance calorifique produite par le métabolisme doit être égale à la puissance dissipée dans l'environnement par la respiration, la transpiration, la conduction, la convection et le rayonnement du corps. »

CONFORT THERMIQUE DANS LES LIEUX DE VIE, M. LE GUAY, FONDATION EFB

### Une approche pluridisciplinaire des cheminées solaires

T. Monfort-Ginet, 2017

Le corps produit de l'énergie principalement par le métabolisme. En transformant les nutriments issus de l'alimentation en molécule comme le glucose. Ces molécules sont utilisées dans les cellules pour produire de l'ATP, principale sources d'énergie pour la contraction musculaire, le fonctionnement des organes et la régulation thermique qui engendrent une montée la température corporelle.

Le corps produit de l'énergie principalement par le métabolisme. En transformant les nutriments issus de l'alimentation en molécule comme le glucose. Ces molécules sont utilisées dans les cellules pour produire de l'ATP, principale sources d'énergie pour la contraction musculaire, le fonctionnement des organes et la régulation thermique qui engendrent une montée la température corporelle.

Une partie de cette énergie est dissipé par le corps à l'environnement via quatre mode de transmission :

- la respiration : La circulation d'air ambiant à l'intérieur de nos poumons représente une perte de chaleur proportionnelle au débit d'air expiré.

- la transpiration : la sueur qui traverse la peau s'évapore à sa surface ce qui fait perdre de l'énergie grâce à la chaleur latente

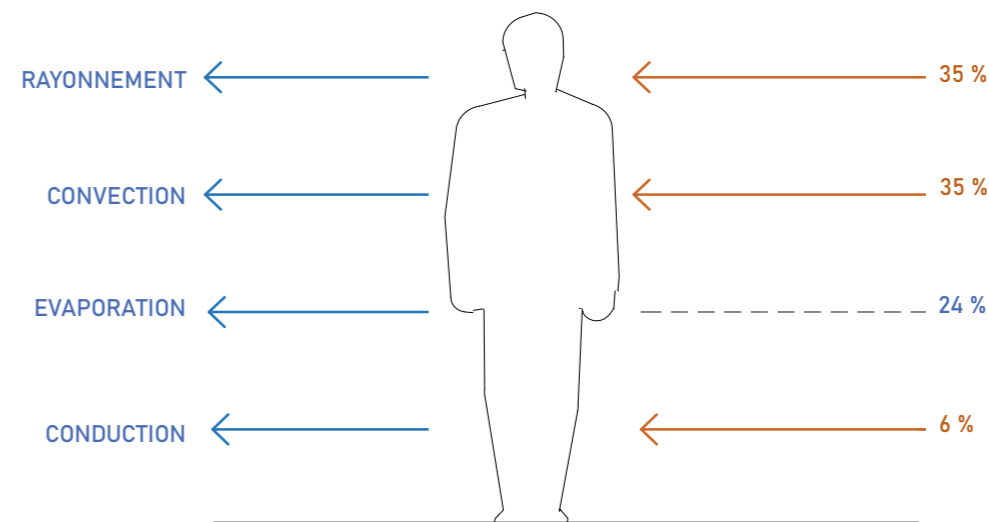
- la conduction : la chaleur quitte le corps par la peau lorsque cette dernière est en contact avec une surface froide.

- la convection : l'air ambiant qui est au contact de la peau se réchauffe et donc emporte de la chaleur corporelle. La quantité de chaleur dépend de la température de l'air en contact mais aussi de la vitesse relative de l'air par rapport au corps humain. Plus l'écart de vitesse entre l'air et le corps est grand, plus la quantité d'énergie prise est grande.

- le rayonnement : toutes les surfaces émettent un rayonnement électromagnétique qui peuvent transférer de l'énergie sous forme de chaleur à un corps.

## Echange thermique ▾

Auteur : production personnelle



Pour arriver à l'équilibre thermique, il faut que la puissance énergétique produite par le corps soit égal à celle qu'il dissipe. En effet, le corps humain produit de l'énergie par son métabolisme, notamment sous forme de chaleur. Cette chaleur est partiellement dissipée vers son environnement. L'équilibre thermique est donc atteint lorsque la chaleur produite est égale à la chaleur perdue, ce qui permet de maintenir une température corporelle stable.

Seulement, l'environnement influence cet équilibre car elle apporte des échanges thermiques supplémentaires de l'environnement vers le corps.

La température ambiante autour du corps aura un impact significatif sur celle du corps. Au-delà de 26°C, l'air ambiant aura tendance à empêcher la dissipation de la chaleur du corps et donc sa régulation thermique.

L'hygrométrie de l'air ambiant a également un rôle important. Elle se définit par le rapport entre la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air et la masse maximale qu'il peut contenir à la même température. De cette manière, si l'air ambiant contient trop de vapeur d'eau, la transpiration a du mal à s'évaporer, ce qui limite la perte de chaleur par la sueur.

Il est important de bien gérer les apports thermiques d'un espace intérieur pour ne pas provoquer une surchauffe corporelle. Si l'énergie thermique dissipée par le corps ne suffit plus à compenser les apports externes de chaleur sur le corps, on risque la surchauffe. Il est également nécessaire de faire attention à ne pas avoir un trop grand écart de température dans un même espace. L'écart maximum entre la température de l'air au niveau de la tête et celle au niveau des pieds ne doit pas dépasser 3°C.

Pour garantir le confort thermique au sein d'un espace intérieur, il est important de maintenir une température ambiante confortable par une bonne isolation du bâtiment. Une bonne inertie du bâtiment permet de maintenir cette température et de limiter les apports externes de chaleur à l'intérieur. Il est également important de bien ventiler les espaces pour conserver une hygrométrie entre 40% et 60%. Il est néanmoins nécessaire de contrôler convenablement les mouvements de l'air (environ 0,3 m/s).

Pour évaluer le confort thermique ressenti dans un espace, il faut mesurer la température opérative.

### Température opérative

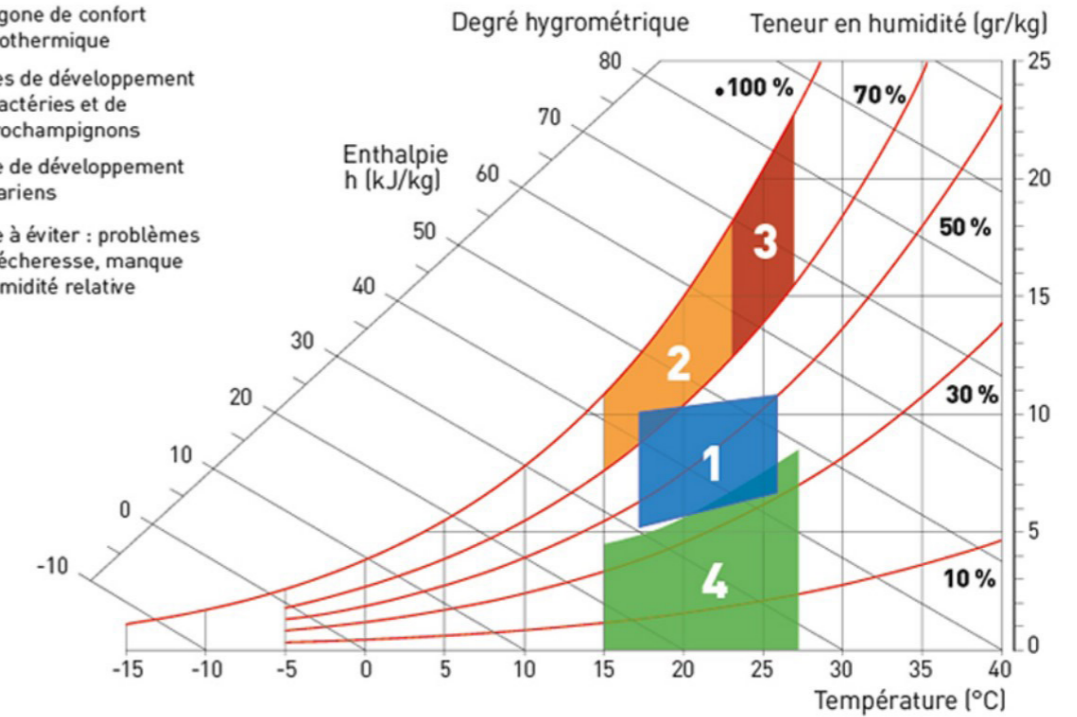
« La température opérative correspond à la température qui est ressentie par l'occupant. Elle prend en compte la température de l'air dans la zone d'occupation et les effets de rayonnement. »

LES AMBIANCES THERMIQUES D'ÉTÉ DANS L'HABITAT DE LA PÉRIODE COLONIALE A PATIO

BOULFANI WARDA, 2010

La température opérative se mesure par la moyenne de la température de l'air ambiant et de celle des parois.

- 1 Polygone de confort hygrothermique
- 2 & 3 Zones de développement de bactéries et de microchampignons
- 3 Zone de développement d'acariens
- 4 Zone à éviter : problèmes de sécheresse, manque d'humidité relative



### Zone de confort hygrothermique ▲

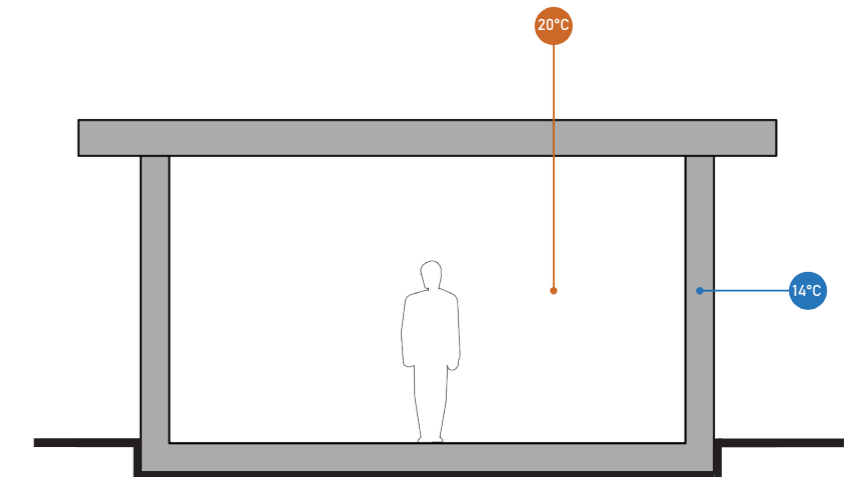
Lien entre température ambiante et degré d'humidité pour repérer la zone de confort

Source : Construire confortable, Bluetek, de nature à créer le bien être

2019

### Température ressentie ▶

Auteur : production personnelle



Température opérative : 17°C

Le logiciel Dial+ permet d'analyser les capacités de simulation thermique dans certaines pièces du projet.

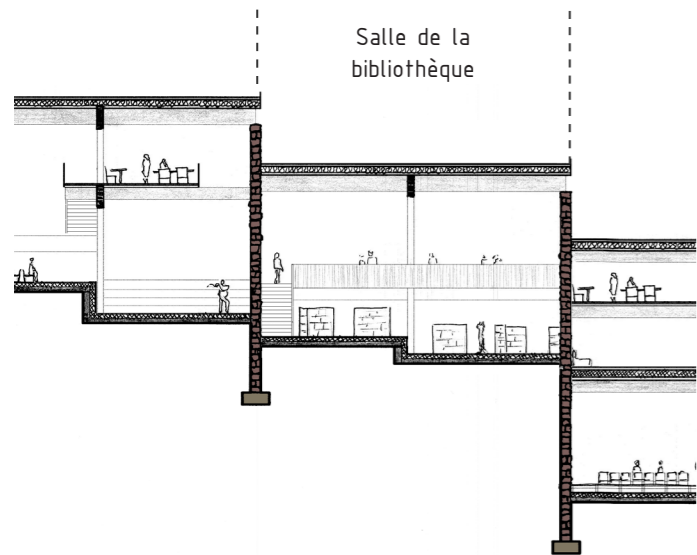
Il est possible d'analyser la température opérative de pièces références du projet en tenant compte des apports thermiques, de ventilation, de l'inertie des matériaux et des conditions climatiques extérieures.

Grâce à ses informations, il est possible d'évaluer le confort thermique ressenti dans le refuge climatique.

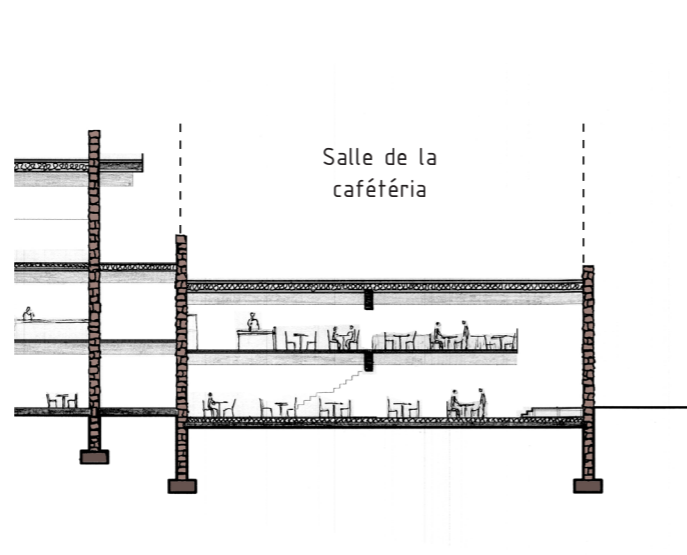
Pour bien comprendre les enjeux des éléments mis en place pour garantir le confort thermique, l'analyse se fait en trois phases :

- 1** Pas de protection solaire, pas d'émetteur de chaleur, pas d'émetteur de froid.
- 2** Protection solaire (débord de toiture 2 m au dessus de la fenêtre), store en toile intérieur et ouverture manuelle des fenêtres.
- 3** Protection solaire (débord de toiture 2 m au dessus de la fenêtre), store en toile intérieur, ouverture automatique des fenêtres si la température intérieure dépasse 22°C, émetteur de chaleur, émetteur de froid et ventilation continue.

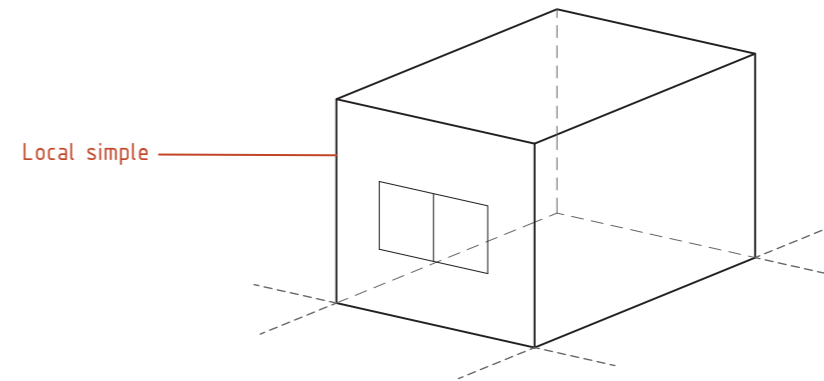
Local de test A :



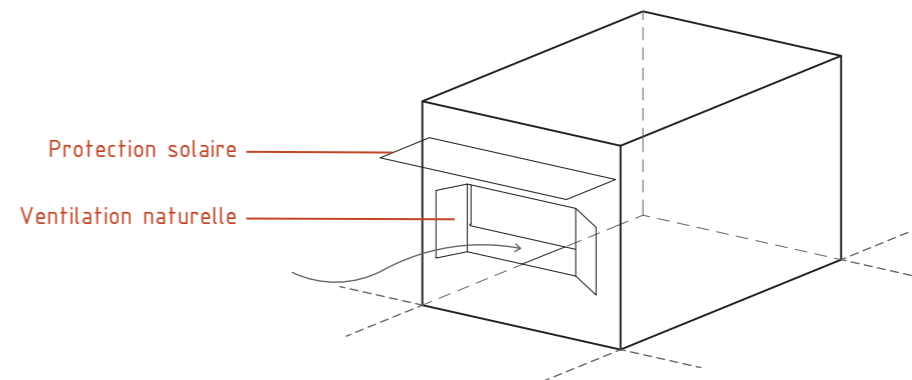
Local de test B :



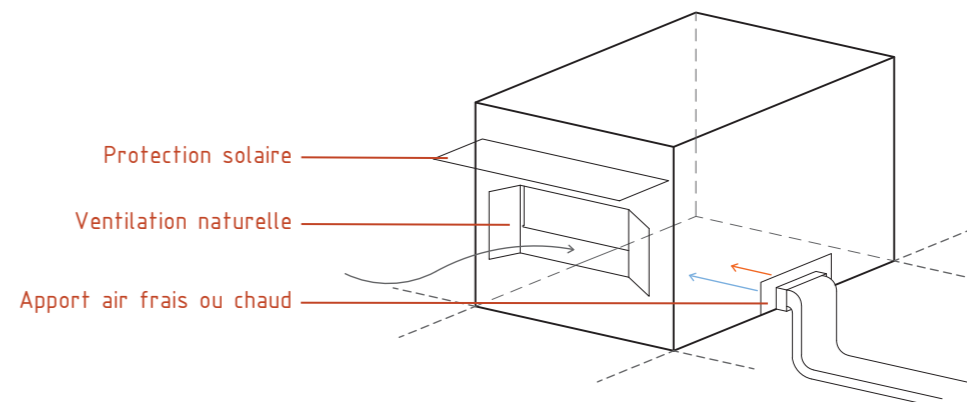
1



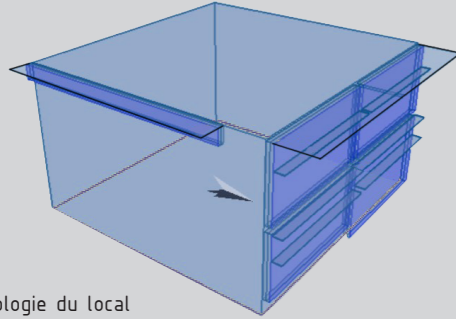
2



3



# SALLE DE LA BIBLIOTHEQUE

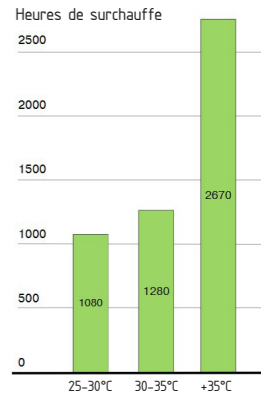
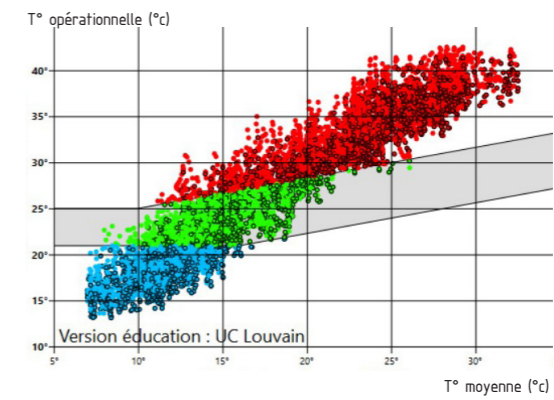
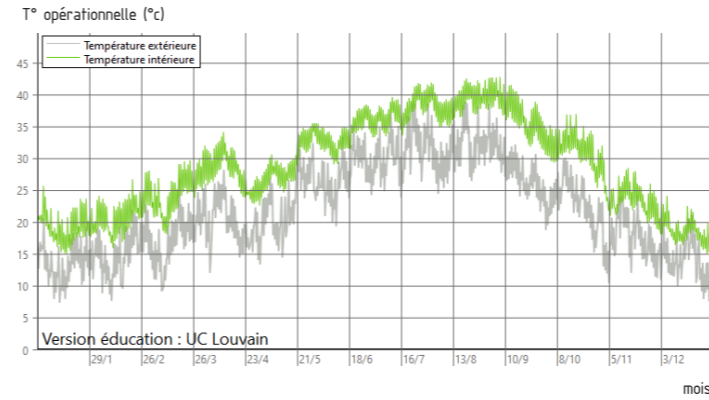


Morphologie du local

1

Sans protections solaires, systèmes de chauffage et de refroidissement, la température de la salle de la bibliothèque évolue au cours de l'année de la même manière que la température extérieure. On constate une température opérative d'environ 5°C de plus qu'à l'extérieur. Le local subit le phénomène d'effet de serre en réchauffant l'air intérieur sans qu'elle puisse s'évacuer.

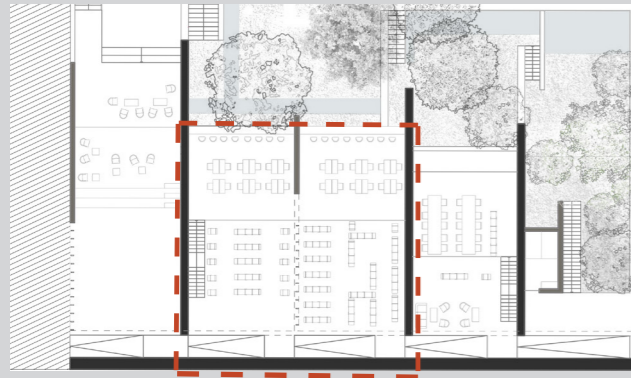
Le confort thermique est largement insuffisant. On remarque que la pièce est en état de surchauffe la plupart du temps avec des valeurs qui peuvent dépasser 35°C.



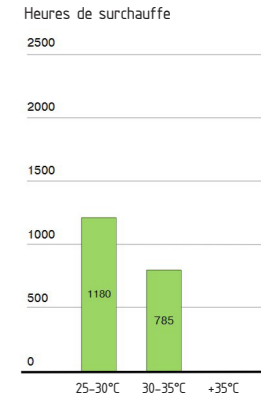
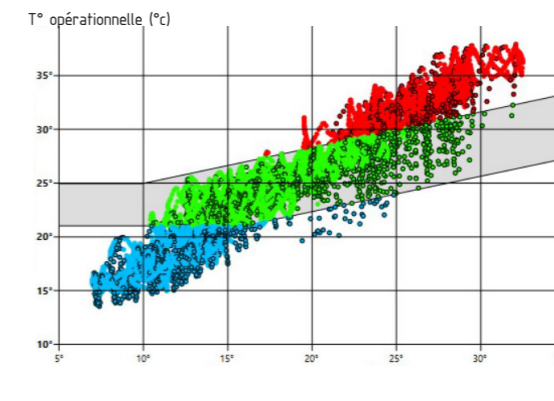
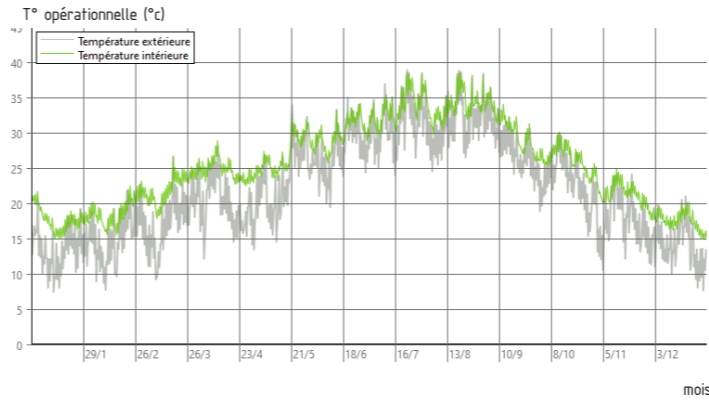
2

Grâce aux protections solaires devant les vitres et les stores automatisés, le local subit moins le rayonnement solaire à travers les fenêtres qui causait cette différence de température avec l'extérieur. La température opérative suit la courbe de la température extérieure. La température du local est équivalente à la température extérieure, sauf en hiver où elle est légèrement plus haute.

Même si il y a moins de surchauffe, le confort thermique reste insuffisant. La pièce n'est pas en mesure de protéger les usagers de la chaleur l'été et de la fraîcheur l'hiver.



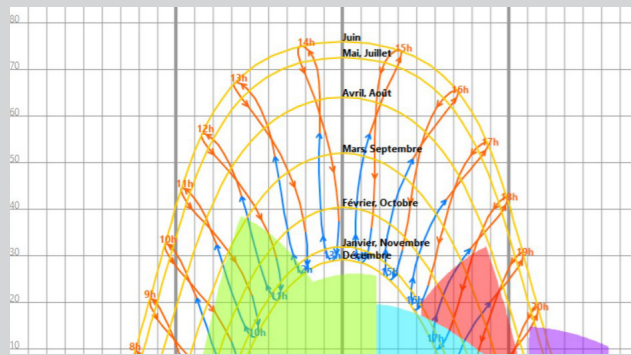
Emplacement du local



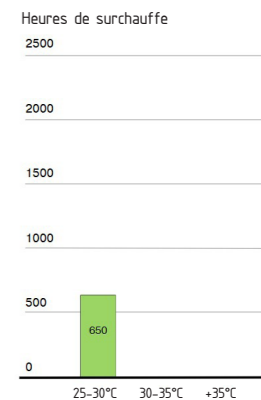
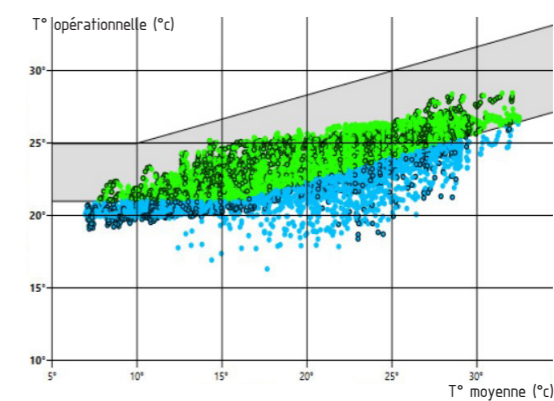
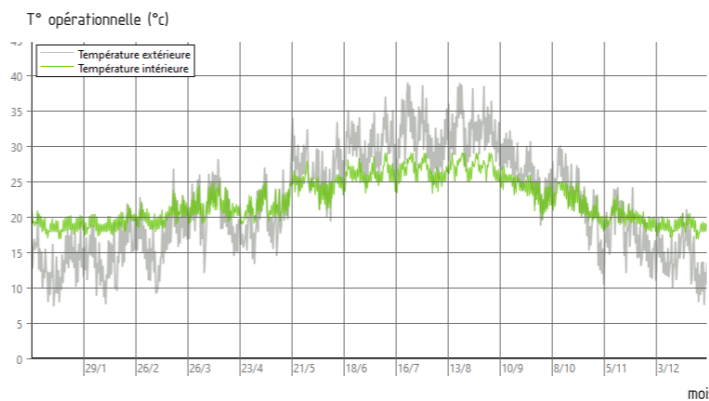
3

Avec des systèmes de ventilation, de climatisation et de chauffage par convecteur qui s'apparentent au réseau de puits canadien et au flux de l'air refroidi par la faille, on obtient une température opérative qui reste stable, entre 19 et 25°C, au cours de l'année. Pour garantir cette température, les puits canadiens doivent avoir une efficacité semblable à un chauffage par convection d'une puissance de 5 kW en hiver. Les systèmes de climatisation équivalent à une climatisation d'une puissance de 7 kW en été.

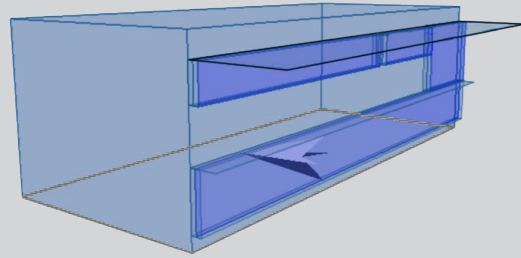
De cette manière, le confort thermique est assuré et le local remplit les caractéristiques d'un refuge climatique.



protection solaire de l'environnement proche



## SALLE DE LA CAFETERIA

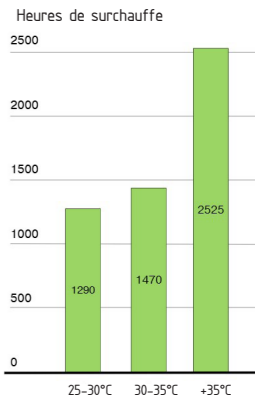
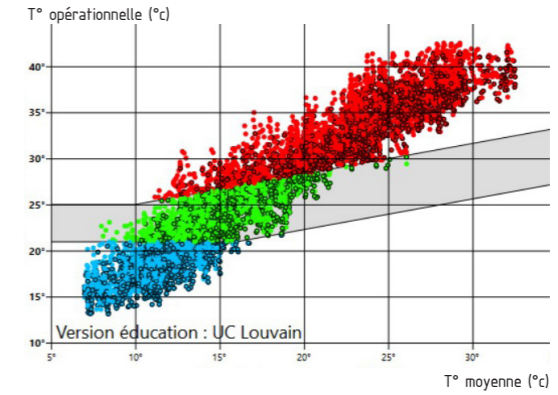
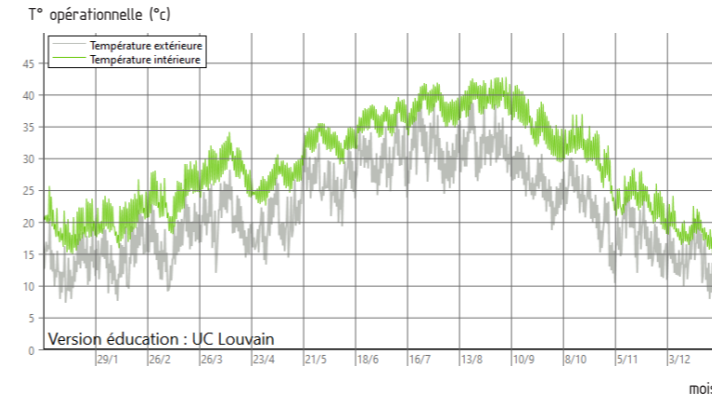


Morphologie du local

1

Sans protections solaires, systèmes de chauffage et de refroidissement, la température de la salle du restaurant évolue au cours de l'année de la même manière que la température extérieure. On constate une température opérative d'environ 10°C de plus qu'à l'extérieur l'été. Le local subit encore plus le phénomène d'effet de serre à cause de ses nombreuses fenêtres orientées au sud.

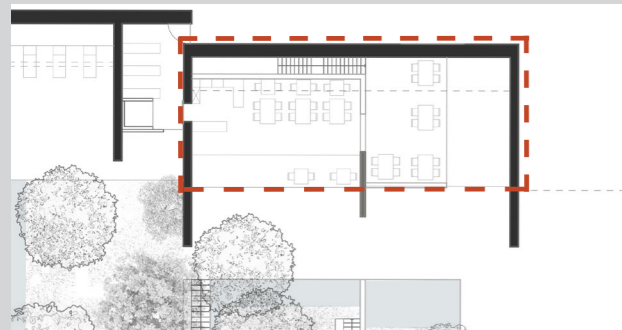
Le confort thermique est largement insuffisant. On remarque que la pièce est en état de surchauffe la plupart du temps avec des valeurs qui peuvent dépasser 40°C.



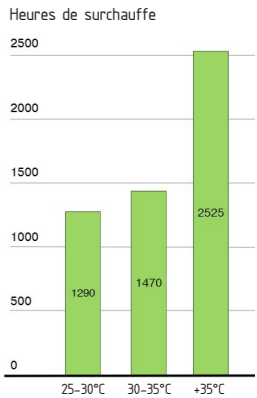
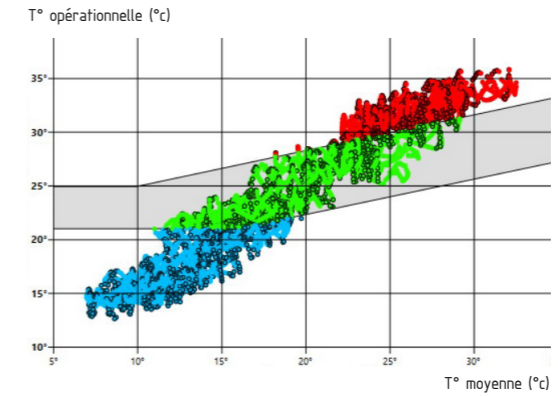
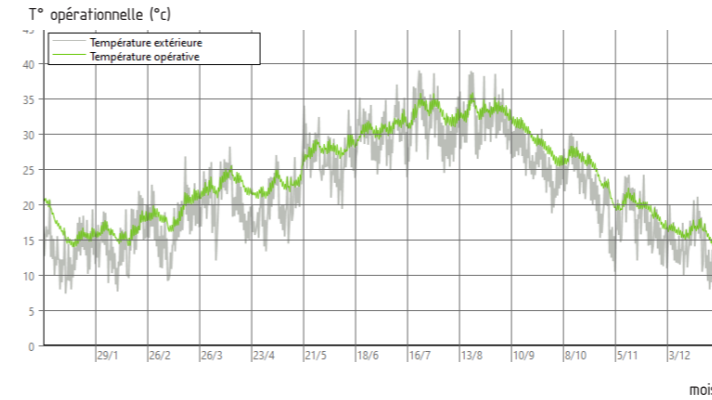
2

Grâce aux protections solaires devant les vitres et les stores automatisés, le local subit moins le rayonnement solaire à travers les fenêtres qui causait cette différence de température avec l'extérieur. La température opérative suit la courbe de la température extérieure. Elle est équivalente à la température extérieure, sauf en hiver où elle est légèrement plus haute.

Même si il y a moins de surchauffe, le confort thermique reste insuffisant. La pièce n'est pas en mesure de protéger les usagers de la chaleur l'été et de la fraîcheur l'hiver.



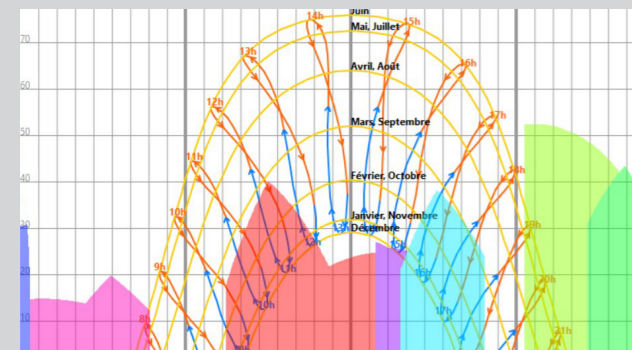
Emplacement du local



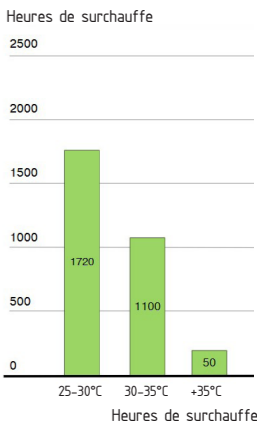
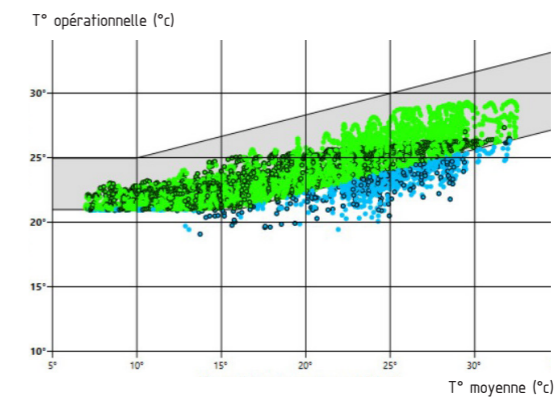
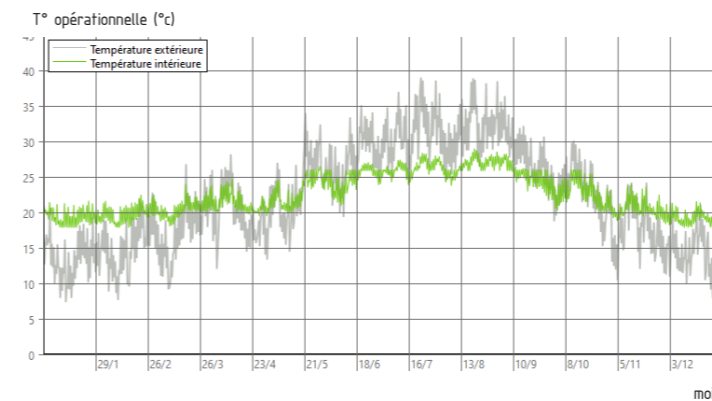
3

Avec des systèmes de ventilation, de climatisation et de chauffage par convecteur qui s'apparentent au réseau de puits canadien et au flux de l'air refroidi par la faille, on obtient une température opérative qui reste stable, entre 19 et 26°C, au cours de l'année. Pour garantir cette température, les puits canadiens doivent avoir une efficacité semblable à un chauffage par convection d'une puissance de 3,5 kW en hiver. Les systèmes de climatisation équivalent à une climatisation d'une puissance de 10 kW en été.

De cette manière, le confort thermique est assuré et le local remplit les caractéristiques d'un refuge climatique.



protection solaire de l'environnement proche



# D Confort visuel

Confort visuel et ambiance lumineuse, définitions et enseignements  
R.Boscher, 2020

Le confort visuel désigne les conditions lumineuses qui permettent de voir et d'interagir avec un environnement sans effort, gêne ou fatigue. Il se réfère à la capacité du système visuel humain à fonctionner efficacement dans un lieu. Le confort visuel exprime donc à la manière dont un individu sera affecté par son environnement lumineux. Selon R.Boscher, elle peut se résumer en trois composants : les besoins, le confort et l'agrément.

Le besoin est la quantité de lumière nécessaire pour faire une activité dans les bonnes conditions. Il est directement lié à la nature de l'activité à effectuer et au besoin lumineux pour la réaliser. On recommande par exemple une quantité de 300 lux pour lire dans une bibliothèque et 500 lux dans un bureau de travail.

Le confort est lié à l'absence d'inconfort qui pourrait évoluer en gêne pour faire l'activité. L'agrément nous rappelle que ce qui est n'est pas désagréable n'en pas confortable pour autant. Ce n'est pas parce qu'il y a pas de gêne qu'un lieu est doté d'un confort visuel. Le lieu peut être perçu comme monotone, ennuyeux, triste. La limite du confort peut dépendre de la sensibilité de chacun.

Assurer le confort visuel au moyen de la lumière naturelle  
Guide bâtimen durable. Brussels

Le confort visuel dépend de facteurs physiques, objectifs et mesurables comme l'éclairage, la luminance, l'éblouissement et le contraste auxquelles s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche à accomplir. Pour garantir le confort visuel, il faut être vigilant à tous ces facteurs.

L'éclairage correspond à la quantité de lumière reçue par une surface. Il se mesure en lux. Il est important d'avoir un niveau d'éclairage adéquat selon l'activité pour permettre à l'utilisateur de voir clairement et sans fatigue.

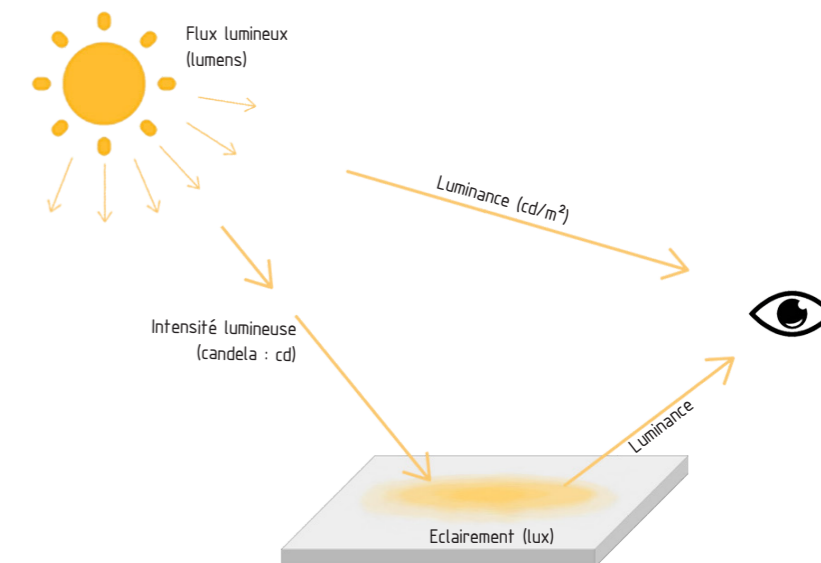
La luminance d'une source est la quantité de lumière émise ou réfléchiée par une surface dans une direction donnée. Elle est étroitement liée à l'éclairage puisqu'elle dépend de la quantité de lumière reçue par la surface. Elle se mesure en candélas par mètre carré (cd/m<sup>2</sup>). Par exemple, un mur blanc exposé à la lumière du jour aura un aspect beaucoup plus brillant ou lumineux qu'une surface mate et sombre. Cela peut provoquer une différence de luminosité entre deux surfaces au sein de la même pièce que l'œil aura du mal à compenser.

L'éblouissement est une sensation visuelle désagréable causée par une trop grande quantité de lumière dans la rétine. Il peut être provoqué par un apport direct d'une source lumineuse dans les yeux ou réfléchi par une trop grande luminance sur une surface. Une éblouissement peut rendre la vision impossible, provoquer des douleurs oculaires et de la fatigue. Il est important de vérifier qu'il n'y a pas de risque d'éblouissement lors de la conception d'un espace.

L'éclairage naturel des bâtiments, confort visuel  
Architecture et climat, UCLouvain

## Grandeurs photométriques fondamentales

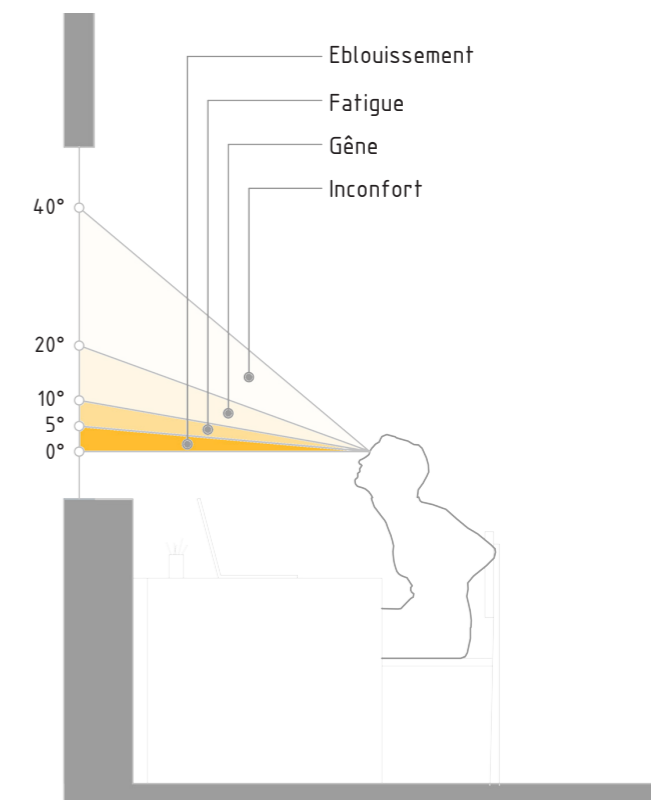
Auteur : production personnelle



## Source lumineuse de haute luminance

Type de gêne occasionnée par la lumière en fonction de l'angle du regard

Auteur : production personnelle



Pour assurer un bon confort visuel dans les bâtiments, des normes spécifiques encadrent la qualité de l'éclairage naturel dans les espaces intérieurs. C'est le cas de la norme européenne NBN EN 17037, dont l'objectif est de garantir des espaces intérieurs plus sains, confortables et économes en énergie. Elle évalue l'éclairage naturel à travers quatre critères principaux :

- la quantité de lumière du jour
- la vue vers l'extérieur
- la protection contre l'éblouissement
- la durée d'exposition à la lumière naturelle

Le critère principal pour évaluer ce confort visuel est la quantité de lumière du jour. Celle-ci est évaluée selon deux approches complémentaires.

La première consiste à mesurer le facteur de lumière du jour, qui représente la part de lumière naturelle entrant dans un espace. On l'exprime en pourcentage.

La seconde repose sur la mesure de l'éclairement intérieur, exprimé en lux, obtenue à partir de simulations basées sur les données météorologiques locales sur une année complète.

Ensemble, elles permettent de déterminer des niveaux de performance en fonction de la quantité de lumière atteignant entre 50% et 95% de la surface intérieure pendant au moins 50% de la journée.

Il est essentiel de noter que la quantité de lumière nécessaire dépend fortement de l'activité pratiquée dans l'espace concerné. Par exemple, un simple couloir peut se contenter de 100 à 200 lux, tandis qu'un bureau ou une salle de classe nécessitera entre 300 et 500 lux pour offrir un confort visuel suffisant. Pour des travaux de précision comme le dessin technique ou les laboratoires, des valeurs allant jusqu'à 750 voire 1000 lux sont recommandées. Cette flexibilité permet à la norme de s'adapter à différents usages et de proposer des objectifs réalistes et pertinents.

Cette exigence s'applique à tous lieux de travail, aux espaces de séjour où l'on reste plus de 30 minutes et tout autres espaces pertinents.

NIVEAU DE PERFORMANCE	FACTEUR DE LUMIÈRE DU JOUR * (MÉTHODE 1)	ÉCLAIREMENT * (MÉTHODE 2)	DOMAINE D'APPLICATION**	pour 50% des heures de jour
Excellent ( <i>'Moyen'</i> dans la norme)	$D_T \geq 3,3\%$	$E_T \geq 500lx$	pour 50% de l'espace	
	$D_{TM} \geq 2\%$	$E_{TM} \geq 300lx$	pour 95% de l'espace	
Mieux ( <i>'Minimal'</i> dans la norme)	$D_T \geq 2\%$	$E_T \geq 300lx$	pour 50% de l'espace	
	$D_{TM} \geq 0,7\%$	$E_{TM} \geq 100lx$	pour 95% de l'espace	
Bon (non défini dans la norme)	$D_T \geq 1,5\%$	$E_T \geq 225lx$	pour 50% de l'espace	
	$D_{TM} \geq 0,6\%$	$E_{TM} \geq 90lx$	pour 95% de l'espace	

\* Valable pour les ouvertures de lumière du jour verticales et obliques.  
Pour les ouvertures de lumière du jour horizontales, seuls  $E_T$  ou  $D_T$  pour respectivement 95 % de la surface et 50 % des heures diurnes sont à atteindre.

\*\* L'incidence de la lumière du jour est calculée au niveau de la pièce.

## Quantité de lumière naturelle dans les espaces intérieurs

### Niveau 1

Auteur : production personnelle par Deluminae

### Norme EN 17037

Source : GRO, référentiel belge de durabilité, 2020

Dans le projet, plusieurs types d'espaces sont concernés. On retrouve des espaces d'atelier, de lecture, de restauration, de repos ou des espaces polyvalents.

L'évaluation de la lumière naturelle s'effectue ici par une simulation dynamique qui mesure le pourcentage de temps d'éclairement à 300 lux qu'ont les espaces intérieurs du projet, du 1er janvier au 31 décembre.

Nous utilisons 300 lux comme unité de référence qui représente la quantité idéale dans un atelier ou dans un espace de lecture. Certains espaces nécessitent moins de lumière comme les espaces de repos, la cafétéria ou l'amphithéâtre.



1. Espace d'accueil et administration : 43,80 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée  
Les espaces bleus qui reçoivent moins de lumière sont dédiés aux stockages de la bibliothèque.

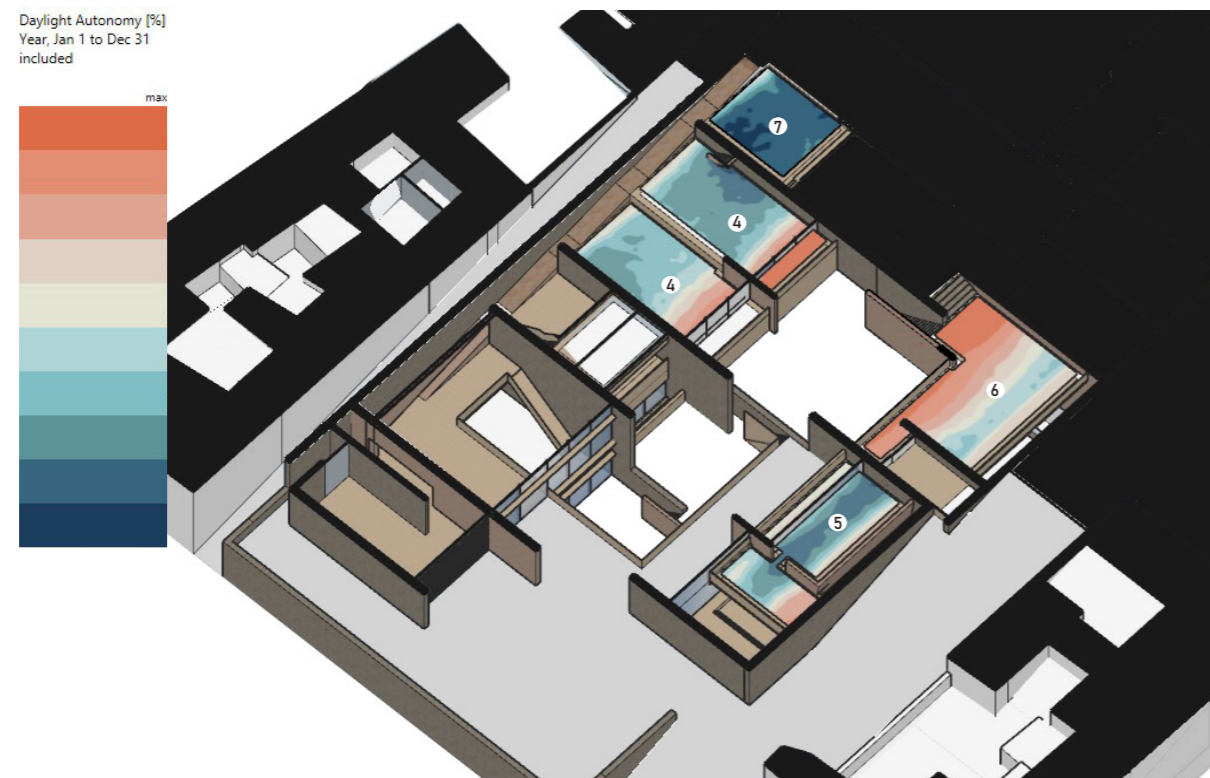
2. Cafétéria : 45,53 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée

3. Espace de repos : 36,17 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée

Quantité de lumière naturelle dans les espaces intérieurs ▾

Niveau 2

Auteur : production personnelle par Deluminae



- 4. Bibliothèque : 36,50 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée  
*Les espaces bleus qui reçoivent moins de lumière sont dédiés aux étagères de la bibliothèques. Les espaces de lectures se concentrent devant les fenêtre du jardin en rouge.*
- 5. Cafétéria et cuisine : 25,03 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée
- 6. Espace de polyvalent extérieur : 95,42 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée
- 7. Mini théâtre : 5,63 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée

Quantité de lumière naturelle dans les espaces intérieurs ▾

Niveau 3

Auteur : production personnelle par Deluminae



- 8. Espace actualité et multimédia : 11,84 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée
- 9. Espace de travail : 85,66 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée
- 10. Espace lecture : 87,90 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée
- 11. Salle polyvalente : 99,41 % de la surface reçoit 300 lux, plus de 50% de la journée

Pour intégrer pleinement les enjeux environnementaux dans la conception d'un bâtiment, il est essentiel d'adopter une approche à la fois durable et flexible.

Répondre uniquement aux besoins présents ne suffit plus. Les nouvelles constructions doivent pouvoir évoluer dans le temps, en minimisant les impacts liés à la démolition et aux transformations lourdes. Cela passe également par le choix de matériaux locaux et durables, favorisant les circuits courts, afin de réduire au maximum l'empreinte carbone tout au long du cycle de vie du bâtiment.

## CHAPITRE 4 UNE CONCEPTION ADAPTABLE ET CIRCULAIRE

- A Facteurs basés sur le contexte
- B Facteurs basés sur la conception spatiale et technique

# A Facteurs basés sur le contexte

## Mur de pierre dans le projet ▶▶

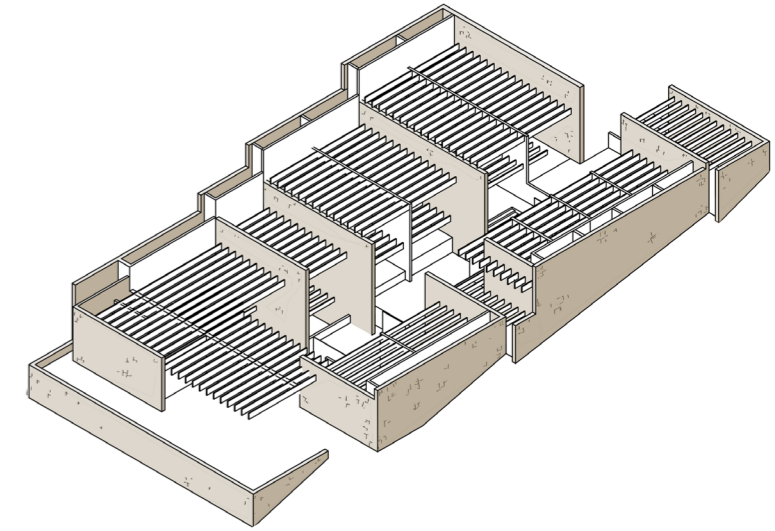
Auteur : Production personnelle

## Carrières d'extraction de pierre en Andalousie ▶

Auteur : Production personnelle

### ● CARRIERE DE PIERRE DANS LA REGION

- |                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| 1 Macael              | 11 Las Cabezas de San Juan |
| 2 Caravaca de la Cruz | 12 Antequera               |
| 3 Los corrales        | 13 Coín                    |
| 4 Lorca               | 14 Mijas                   |
| 5 Novelda             | 15 Cabra                   |
| 6 Albalchez           | 16 Lucena                  |
| 7 Albox               | 17 Ubeda                   |
| 8 Don Benito          | 18 Baeza                   |
| 9 Badajoz             | 19 Morón de la Frontera    |
| 10 Adra               | 20 Alcalá la Real          |



### Matériau, le nouvel âge de pierre du bâtiment

CTB, les cahiers techniques du bâtiment  
A.E. Bertucci, 2023

L'usage de la pierre dans la construction est enraciné dans la tradition de la région de Jaén. On extrait dans la province deux types de pierre : du calcaire (piedra caliza) et du grès (arenisca). Le calcaire est historiquement utilisé dans la ville de Jaén comme en témoigne le château Santa Catalina, perché au sommet de la ville, entièrement construit en pierre calcaire locale.

### Avantages durables de la pierre naturelle

Rosal Stones, natural mediterranean design

La région dispose de nombreux sites d'extraction, ce qui favorise le circuit court et réduit significativement les émissions liées au transport. La pierre, une fois extraite et taillée, ne nécessite pas de traitement industriel supplémentaire avant sa mise en œuvre.

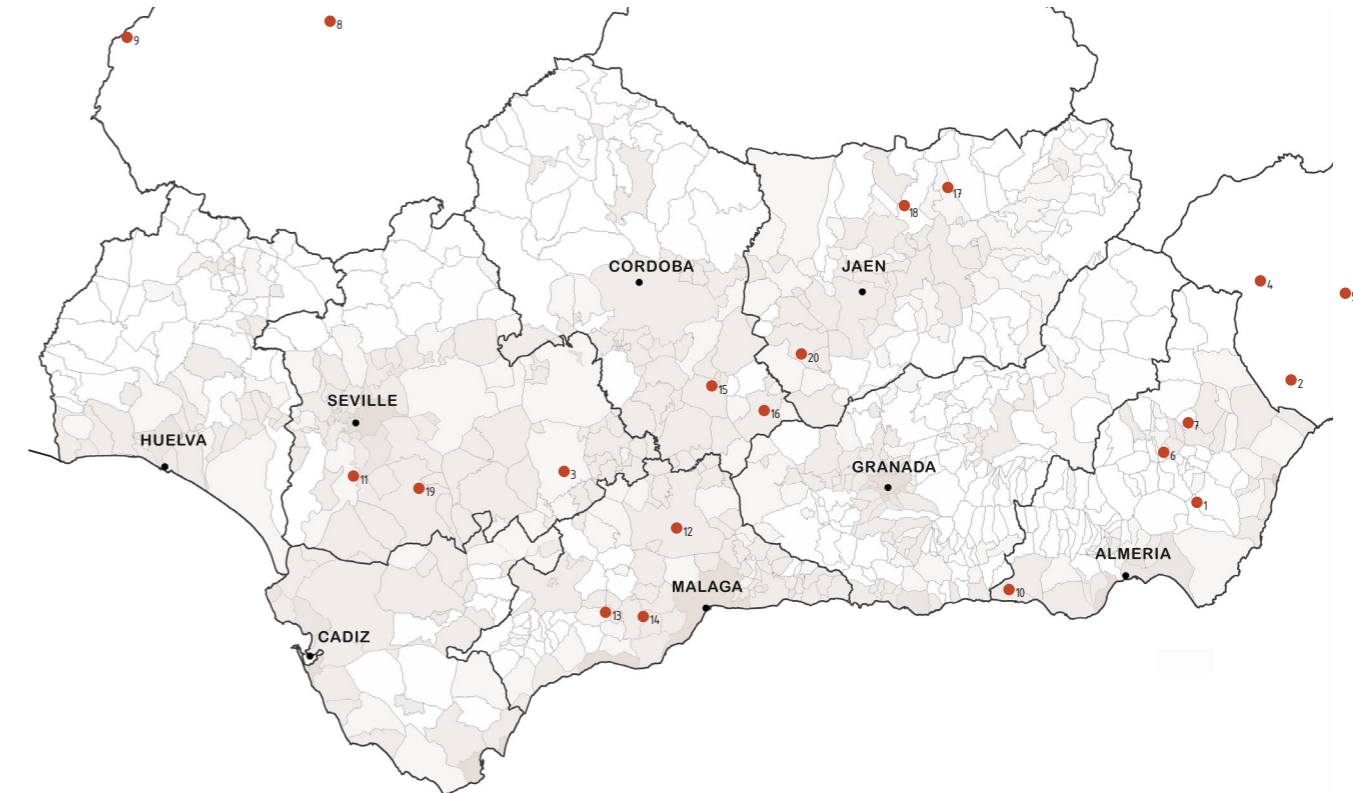
Traditionnellement, la pose s'effectue avec un mortier naturel à base de chaux (Biocalce Piedra), mélangé à du sable local et de l'eau. Ce mode de mise en œuvre assure non seulement une bonne compatibilité avec la pierre, mais offre également un rendu esthétique grâce à la patine que le matériau développe avec le temps.

### La durabilité de la pierre comme matériau de construction

Polycor, pierre naturelle

De plus, l'impact écologique de la pierre est largement amorti par sa longévité. Selon la société «Polycor», un bâtiment construit en pierre peut atteindre une durée de vie de plus de 100 ans, et même dépasser les 500 ans s'il est correctement posé et entretenu : rejointement ponctuel et mouvement de sol limité.

Autrement, la pierre est facilement réutilisable. Il est courant de voir des blocs provenant de bâtiments anciens intégrés dans une nouvelle construction ou dans le cas d'une restauration. Ce procédé évite une sur-extraction supplémentaire des sols qui ne serait pas nécessaire.



### Nk Mip Desert Cultural Centre ▶

Source : Devita, construction en terre crue

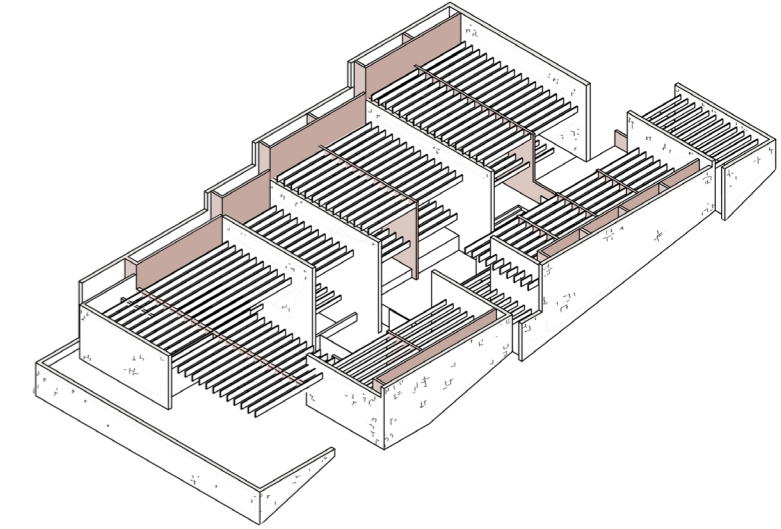
### Mur de pisé dans le projet ▶▶

Auteur : Production personnelle

### Mise en oeuvre d'un mur en pisé ▼

Auteur : Production personnelle

La construction de murs en pisé est une technique en terre crue compactée traditionnelle des architectures vernaculaires du sud de l'Europe et du Maghreb. Il faut une terre argilo-limoneuse contenant 20-30% d'argile, du sable et du gravier. Cette terre est très répandue et provient généralement du site du projet, ce qui est en fait un matériau géosourcé.



### Géosourcé

« Les matériaux géosourcés sont les matériaux issus de ressources d'origine minérale, tels que la terre crue ou la pierre sèche. En particulier lorsqu'ils sont locaux et peu transformés, les matériaux biosourcés et géosourcés présentent généralement une faible empreinte environnementale. »

### LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION BIOSOURCE/GEOSOURCE

Ministère de la transition écologique et solidaire, [ecologie.gouv](http://ecologie.gouv.fr)

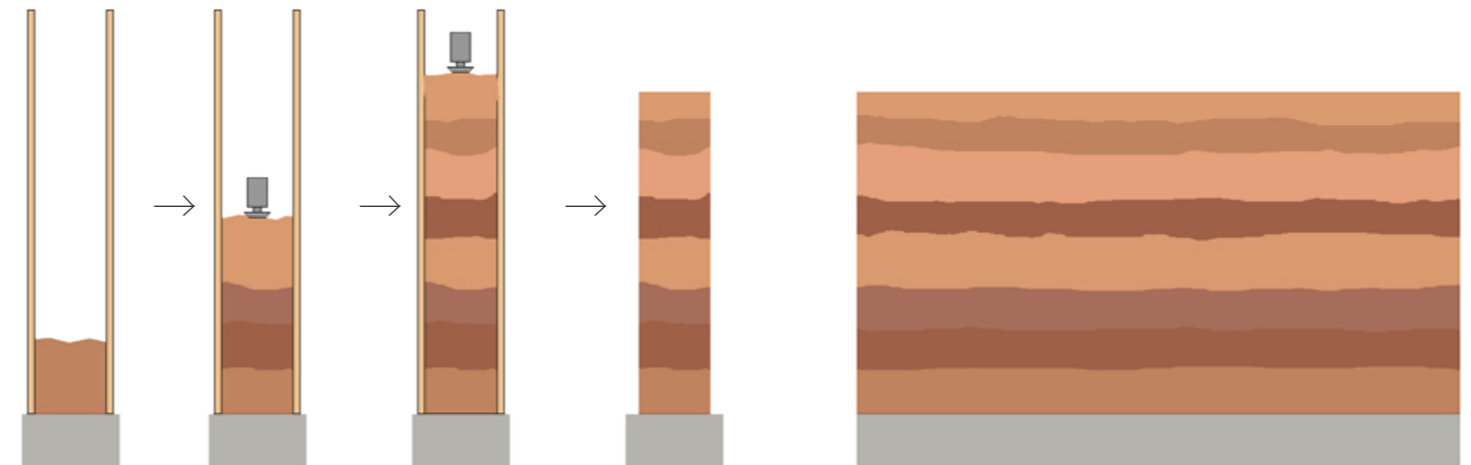
J. Remy

La sol de Jaén a déjà été utilisé pour construire des murs en pisé. En effet, lors de la rénovation de la muraille nord de Jaén, l'idée était de construire des murs en pisé pour soutenir les pierres d'époques de manière à conserver l'esthétique initiale. Ainsi, la terre utilisée a été extraite au bord de la ville, à proximité de la muraille.

Pour réaliser des murs capables de supporter de fortes charges, la terre crue exploite le principe du compactage lors de la mise en œuvre, ce qui lui confère une grande résistance à la compression.

Pour ce faire, le mur de pisé se construit dans un coffrage en entassant des couches successives de 10 à 20 cm de terre légèrement humidifiée. Ce mur doit être construit sur des fondations en pierre pour éviter les remontés capillaires. Chaque couche est alors compactée à l'aide d'un pilon mécanique. Au décoffrage, le mur présente une texture stratifiée causée par les levées successives de toutes les couches, ce qui donne un aspect esthétique au résultat final.

[Pisé](#)  
Wikipédia, 2025



[Le peuplier dans la construction, Innovation dans le peuplier pour de nouvelles applications](#)

Valldolid, M. Sufrategui, 2018

L'Andalousie possède des ressources forestières locales qui peuvent être utilisées pour la construction. La région recueille notamment des forêts exploitables de chêne et de peuplier. Dans la province de Grenade, l'industrie du peuplier est enracinée dans la culture locale. Les vallées irriguées par le fleuve Genil permettent d'avoir des plaines fertiles qui favorisent la pousse des arbres. Le peuplier de cette région est depuis plusieurs siècles utilisé dans la construction locale pour les charpentes.

Le bois est un matériau biosourcé.

Biosourcé

« Un matériau biosourcé est issu de matières premières renouvelables d'origine biologique, végétale ou animale. [...] La caractéristique principale des matériaux biosourcés est leur capacité à être régénérés naturellement sur une échelle de temps relativement courte, ce qui contribue à réduire l'empreinte carbone associée à leur production. »

LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION BIOSOURCE/GEOSOURCE

Ministère de la transition écologique et solidaire, [ecologie.gouv.fr](http://ecologie.gouv.fr)  
J. Remy

De plus, le bois est en plus un puits de carbone. En effet, on considère que son empreinte carbone est neutre puisqu'avant d'être coupé, l'arbre a absorbé une certaine quantité de CO<sub>2</sub>. En effet, lors de la photosynthèse, les feuilles se servent de l'énergie du soleil pour changer l'eau et le CO<sub>2</sub> compris dans l'atmosphère en glucose, procédé qui rejettent de l'oxygène. Selon [Ecotreee.green](http://ecotreee.green), un peuplier d'une masse de 1000kg et d'une durée de vie de 30 à 40 ans absorbe au total environ 870 kg de CO<sub>2</sub>, soit environ 25 kg par an.

A titre de comparaison, un camion de 40 tonnes a une consommation moyenne de 0,342 litres de gazole par km. En utilisant un facteur d'émission standard de 2,68 kg de CO<sub>2</sub> par litre de gazole, cela équivaut à environ 92 kg de CO<sub>2</sub> émis pour parcourir 100 km.

On peut donc considérer que le bilan carbone du bois utilisé dans la construction est largement remboursé s'il provient d'une exploitation locale.

[Combien de CO2 absorbe un arbre ?](#)

Ecotreee, 2018

[Calculer les émissions de CO2 d'un camion ou d'un utilitaire](#)

A. Renoux, [webfleet](http://webfleet.fr), 2024

Poutre en bois lamellé collé ▶

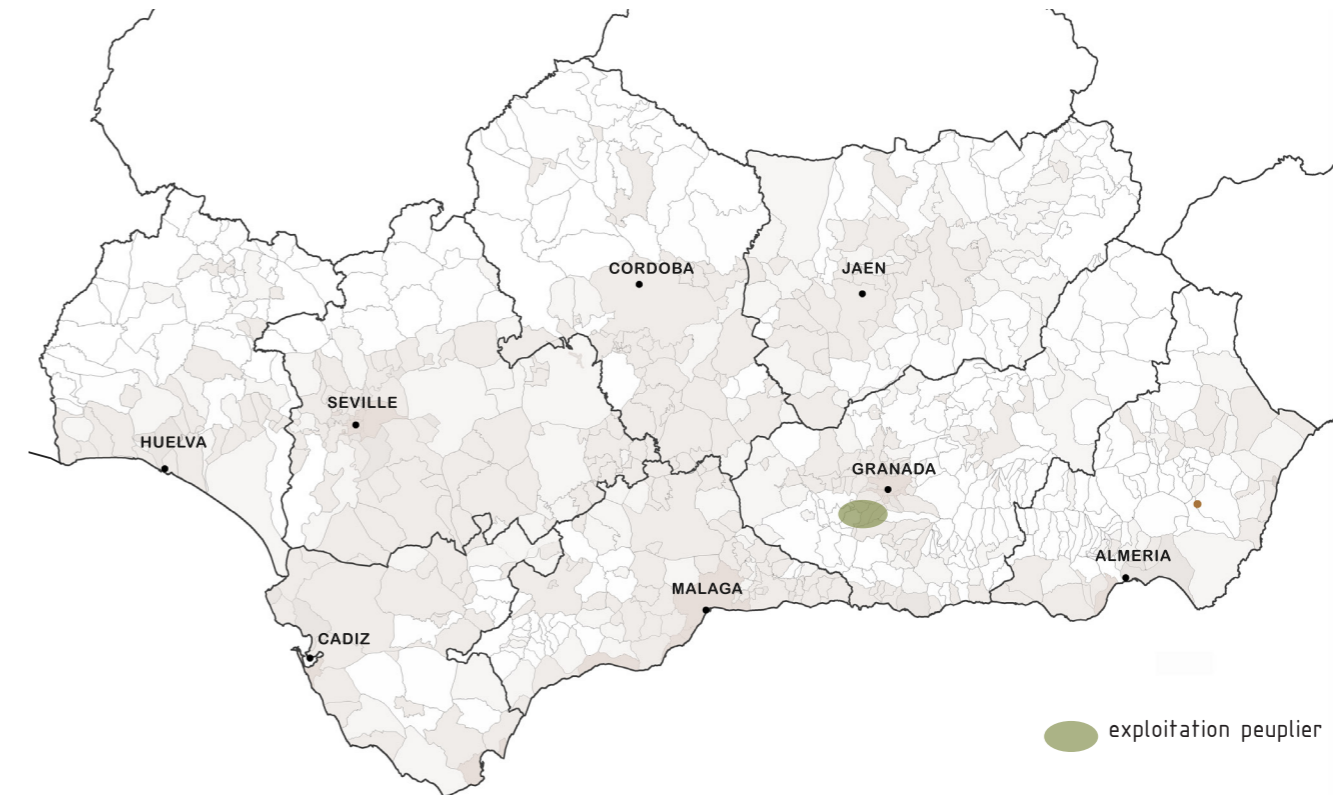
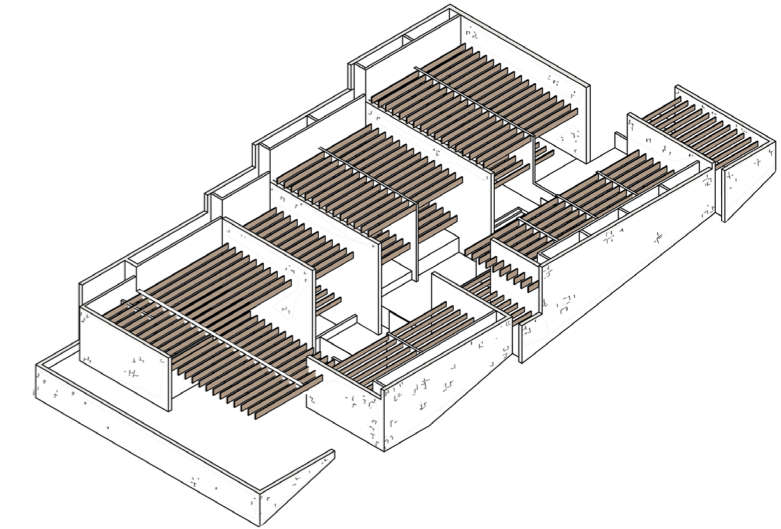
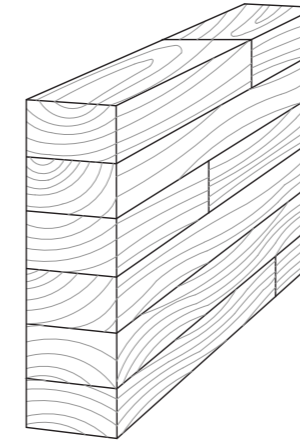
Auteur : Production personnelle

Poutre en bois dans le projet ▶▶

Auteur : Production personnelle

Production de peuplier en Andalousie ▼

Auteur : Production personnelle



● exploitation peuplier

## B Facteurs basés sur la conception spatiale et technique

La démolition d'un bâtiment génère des émissions importantes de CO<sub>2</sub>. Pour limiter ces impacts environnementaux et s'inscrire dans une démarche durable, il est important de concevoir des bâtiments capables de répondre aux besoins actuels, tout en facilitant leur transformation pour de futurs usages. Ainsi, on évite des travaux lourds et coûteux, en se limitant à des modifications mineures des espaces intérieurs.

Un bâtiment adaptable est un bâtiment qui peut évoluer dans le temps sans nécessiter sa démolition ou une transformation structurelle majeure. Dans cette optique, le refuge climatique initialement imaginé comme un équipement public adopte des stratégies architecturales qui permettent de favoriser l'adaptation en une autre fonction. L'objectif est de créer une enveloppe pérenne, capable de protéger durablement la population grâce à une flexibilité d'usage intégrée dès la conception.

La morphologie des espaces intérieurs joue ici un rôle essentiel. La forme, la taille, la hauteur et l'organisation des pièces ont été pensées pour offrir des proportions génériques et facilement adaptables. Les espaces sont ouverts, modulables, organisés en grands plateaux libres avec une hauteur sous plafond généreuse, permettant la mise en place ou le retrait de cloisons, mezzanines, ou faux planchers techniques. Une trame structurelle régulière, avec des murs espacés de 7 mètres, facilite encore la reconfiguration des lieux. De cette manière, ces volumes peuvent ainsi avoir différentes fonctions selon les besoins : bureaux, logements ateliers, salle de classe, etc.

De plus, la structure du bâtiment est construite avec trois matériaux complémentaires : les murs de pierre qui forment l'enveloppe extérieure du bâtiment, les murs de pisé qui organisent et divisent les espaces intérieurs, et les poutres en bois lamellé-collé qui soutiennent les planches d'un mur à l'autre.

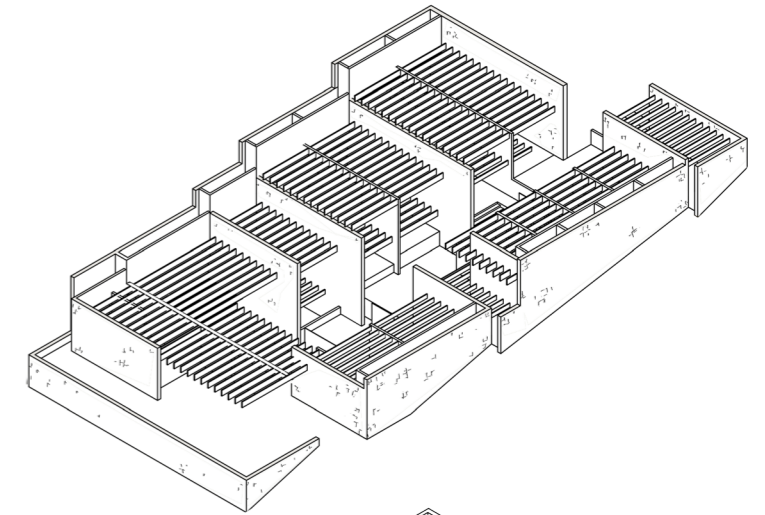
Ces matériaux sont reconnus pour leur durabilité. Un mur en pierre, maçonné dans les règles de l'art, peut durer plus de 500 ans sans difficulté. Les murs en pisé, à condition d'être protégés de l'humidité, ont une longévité équivalente.

L'objectif de cette disposition est de faire durer les murs porteurs dans le temps et de rendre démontables les planchers. Ainsi, les planchers en bois, suspendus entre chaque mur, peuvent être retirés, déplacés, ou réinstallés ailleurs. Cela permet de supprimer, d'ajouter ou modifier un niveau avec la plus grande liberté possible dans chaque pièce.

Ce système structurel modulaire et démontable offre une grande liberté d'aménagement intérieur, et permet au bâtiment de s'adapter à une grande variété d'usages dans le futur.

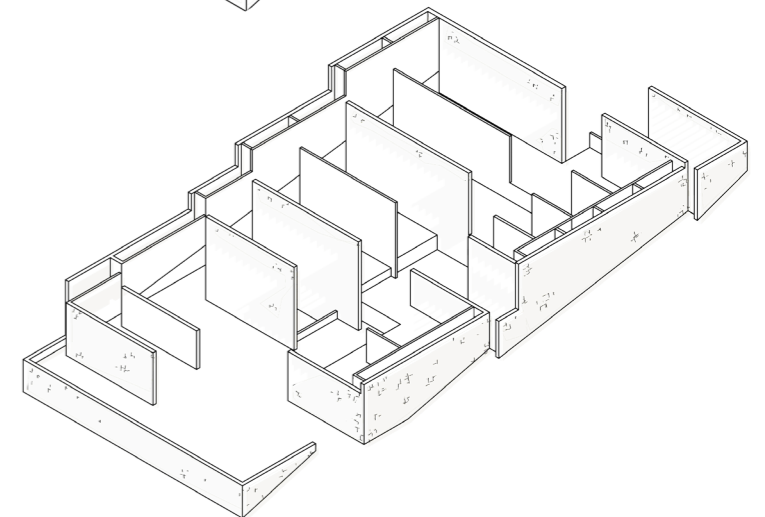
### Projet du refuge climatique ▶

Auteur : production personnelle



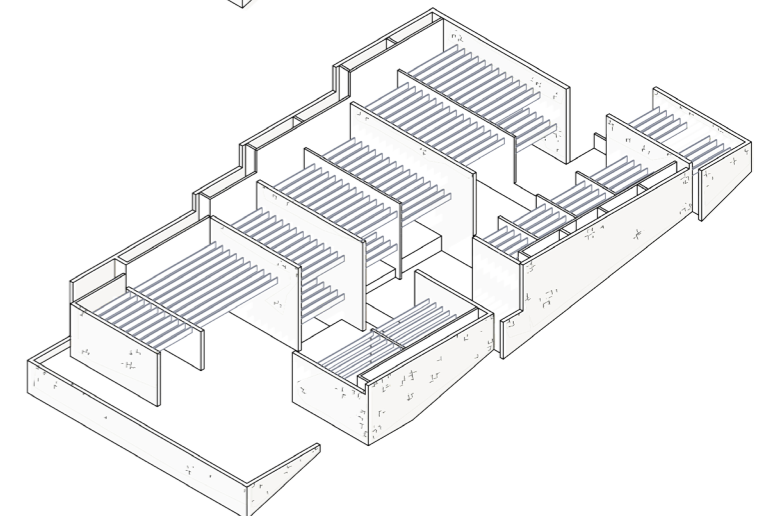
### Murs porteurs ▶

Auteur : production personnelle



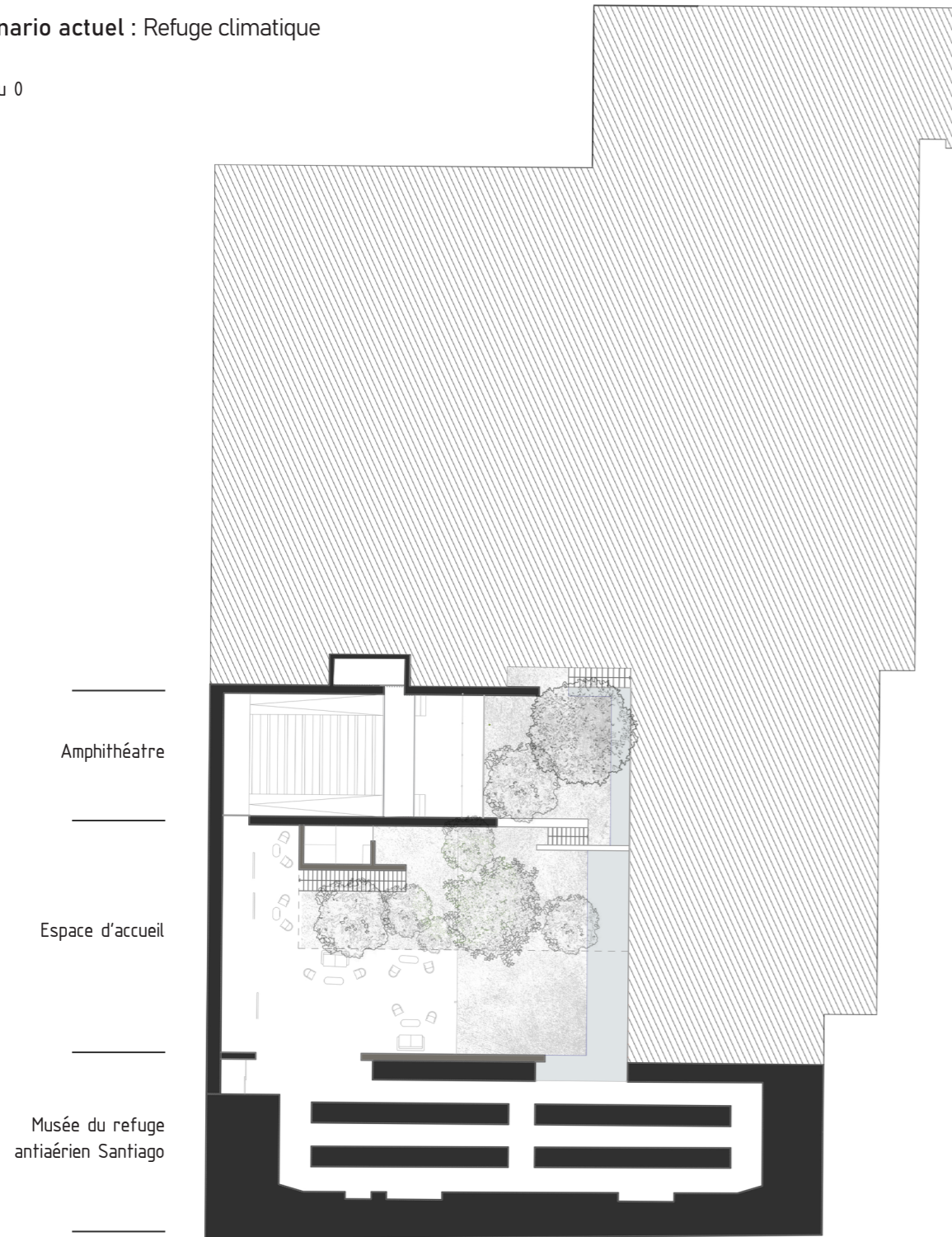
### Planchers en bois déplacés ▶

Auteur : production personnelle



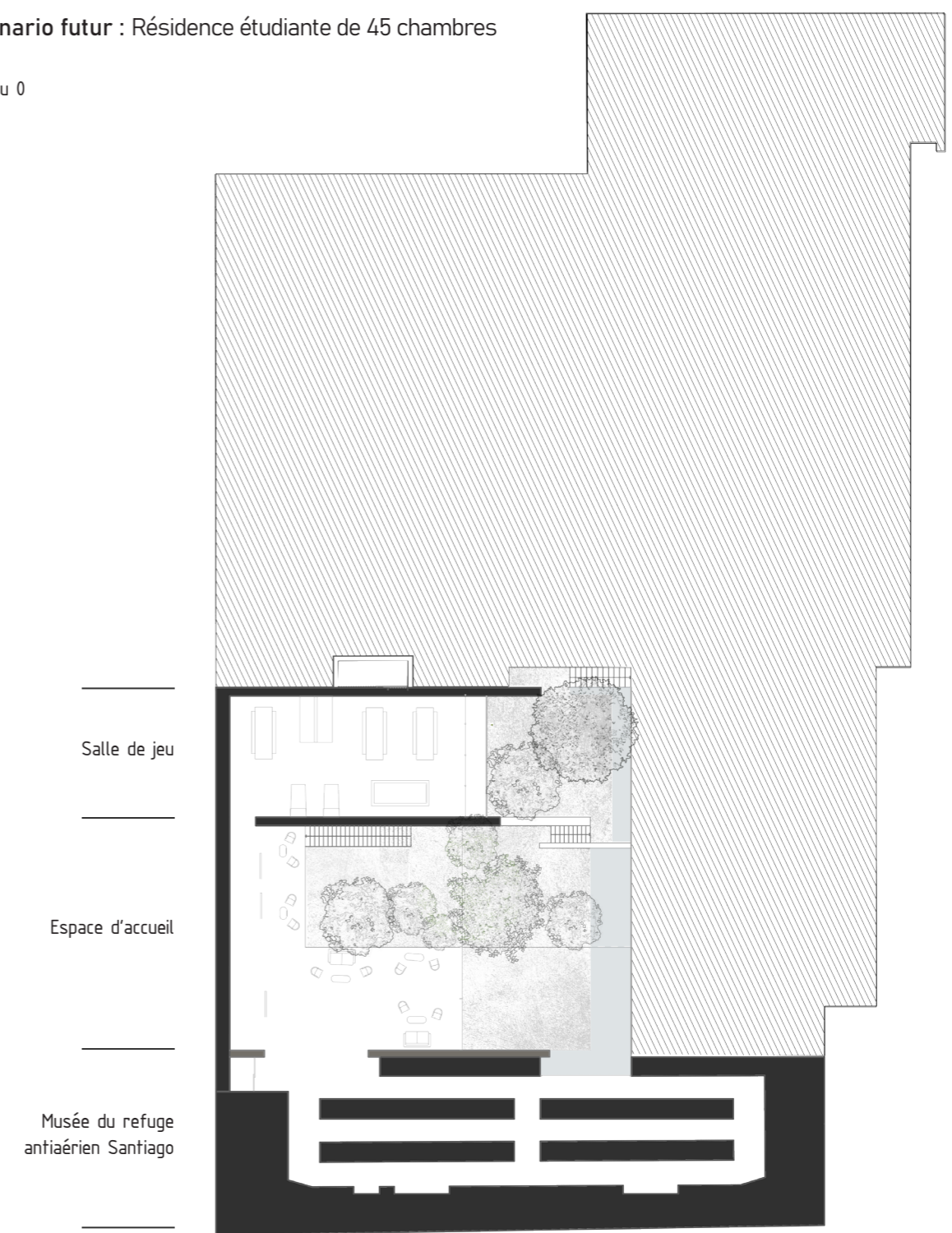
Scénario actuel : Refuge climatique

Niveau 0



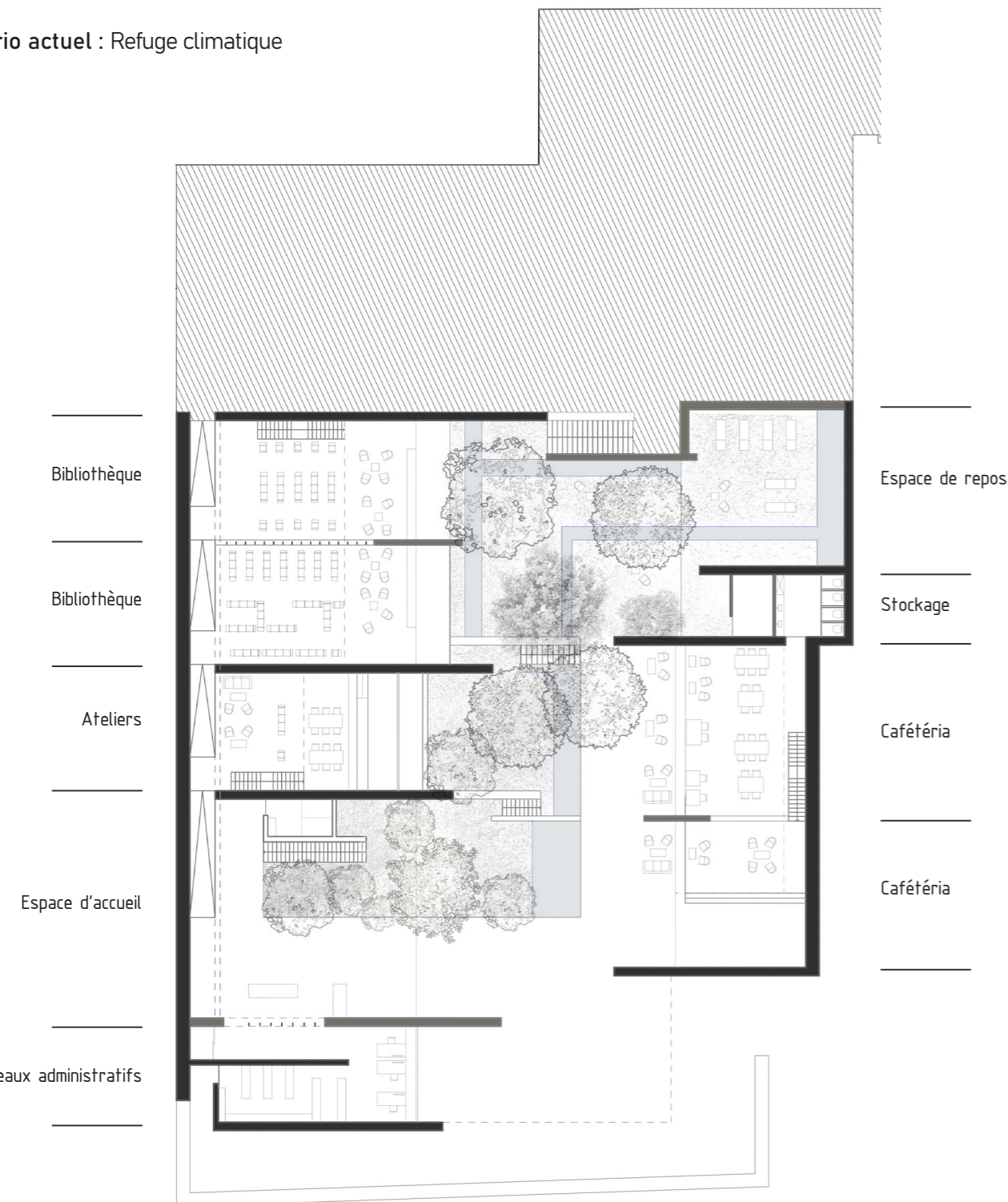
Scénario futur : Résidence étudiante de 45 chambres

Niveau 0



# Scénario actuel : Refuge climatique

Niveau 1



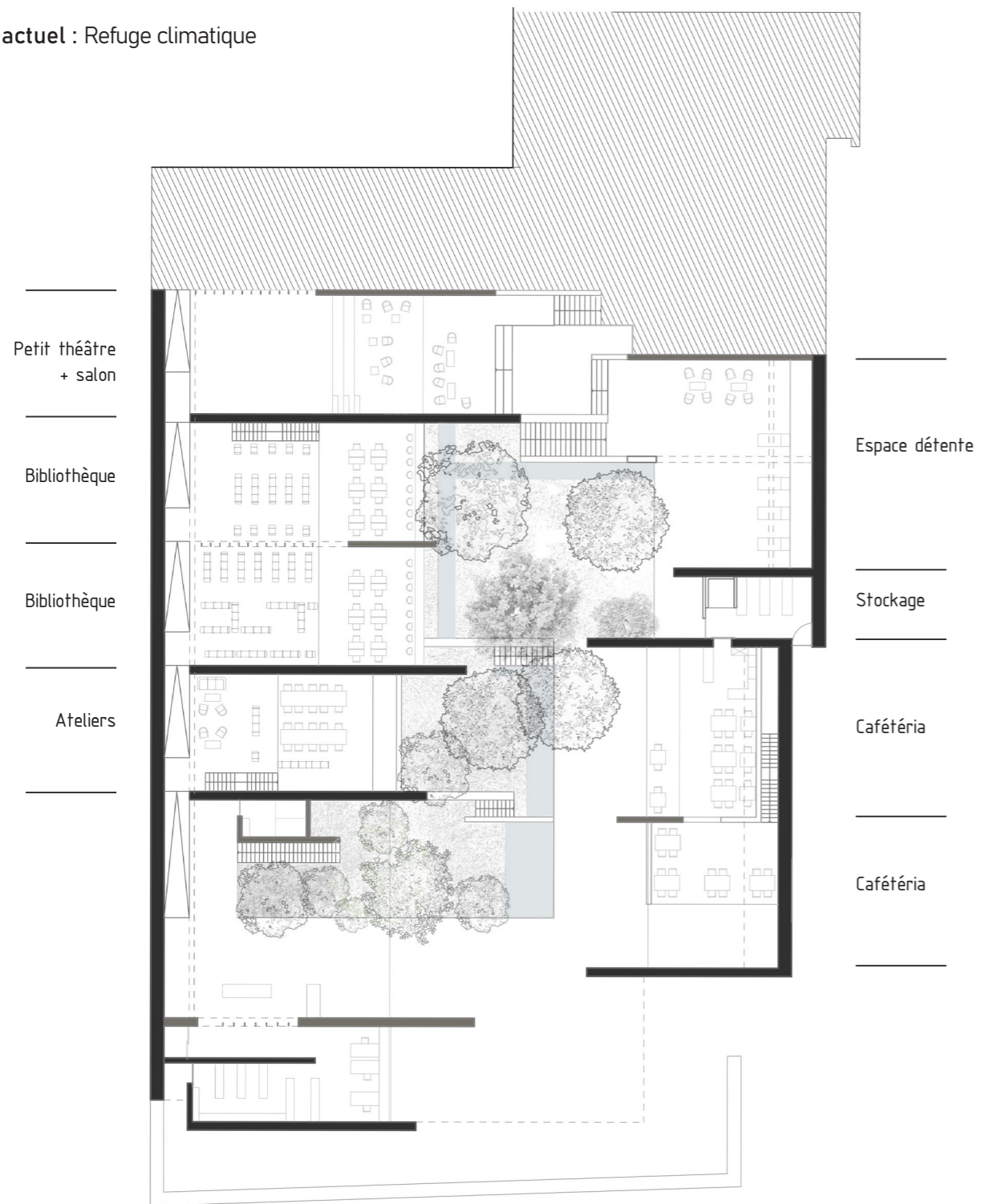
# Scénario futur : Résidence étudiante de 45 chambres

Niveau 1



Scénario actuel : Refuge climatique

Niveau 2



Scénario futur : Résidence étudiante de 45 chambres

Niveau 2

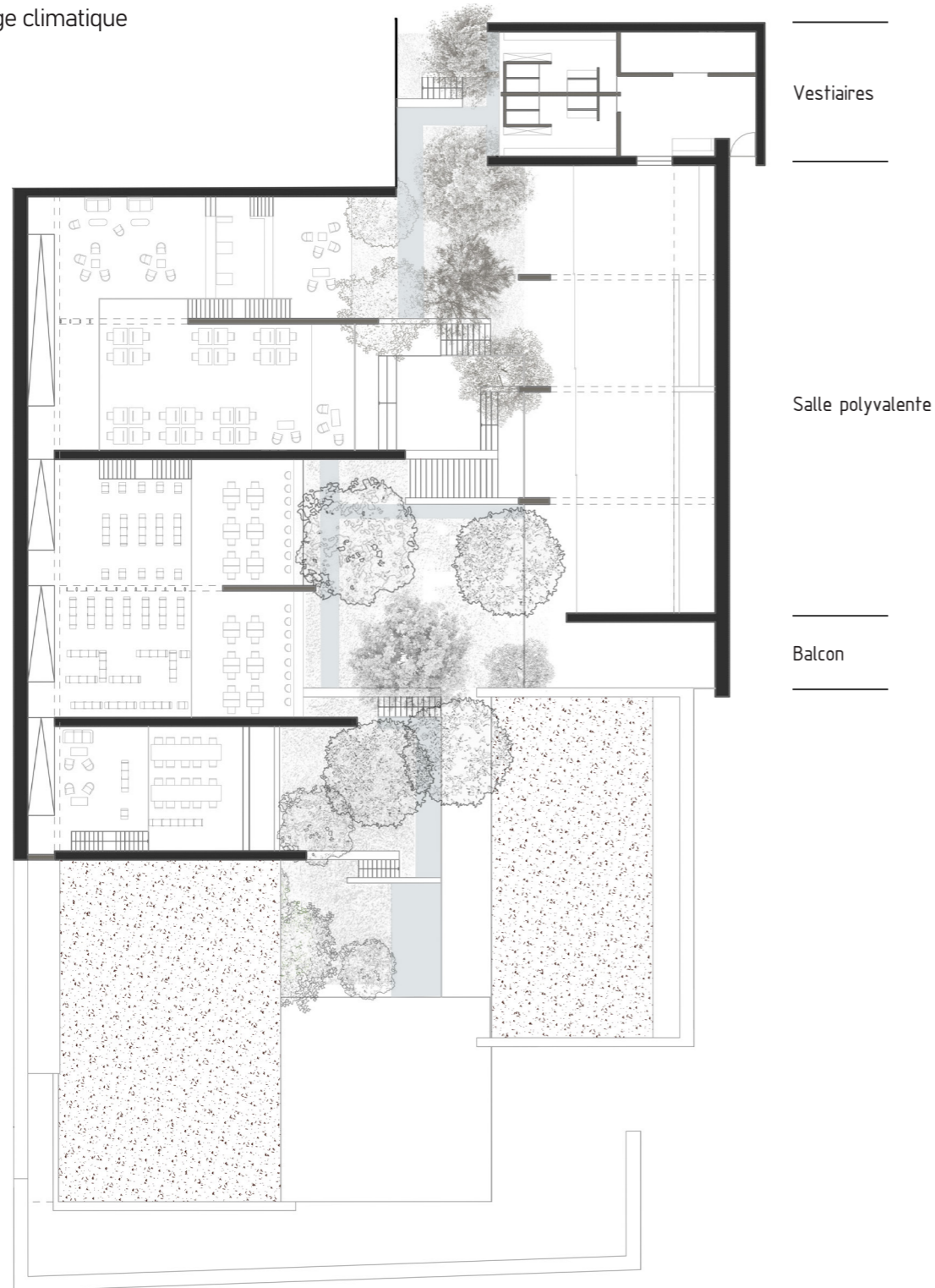


### Scénario actuel : Refuge climatique

Niveau 3

Espace actualité

Espace média  
+ espace de travail



Vestiaires

Salle polyvalente

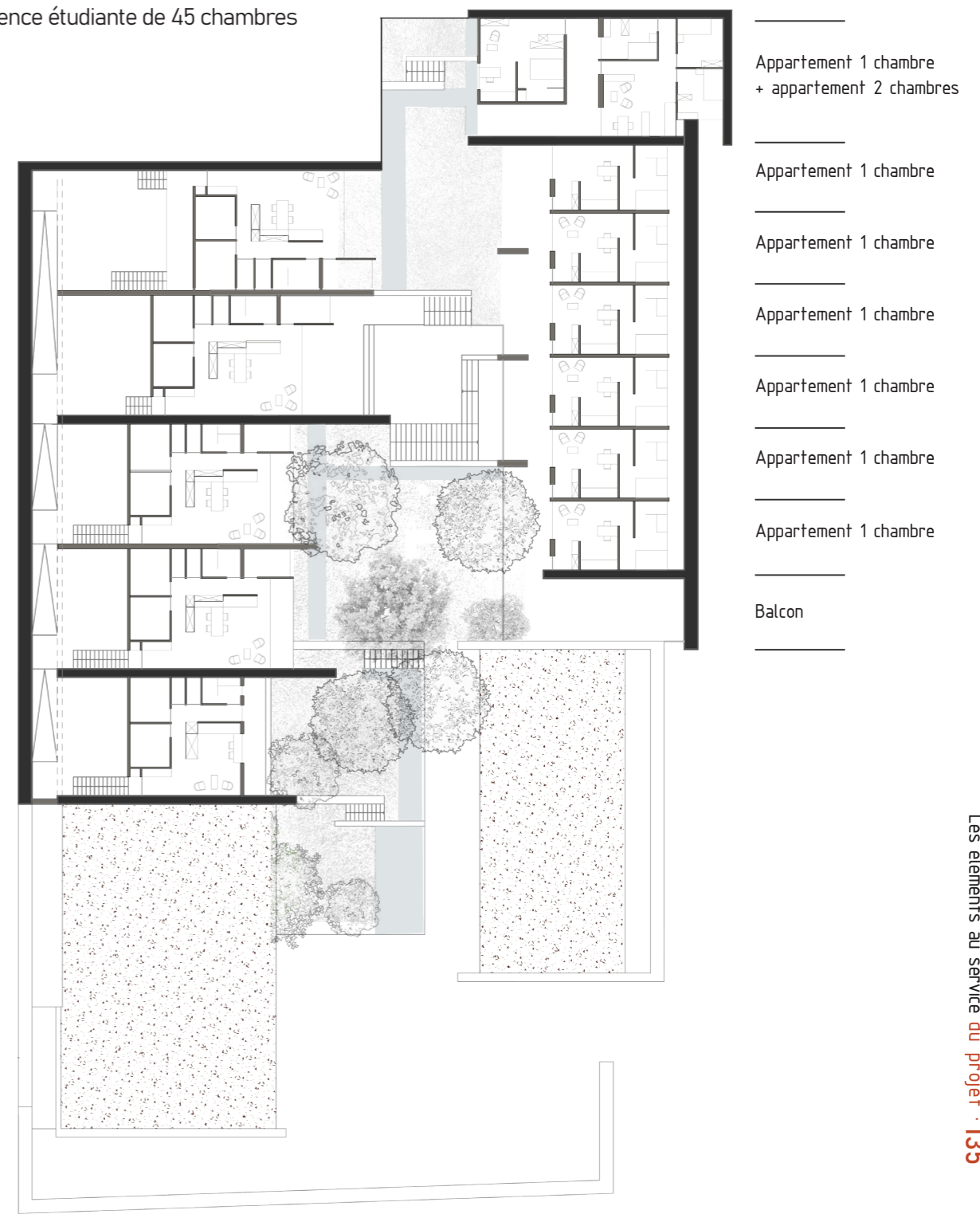
Balcon

### Scénario futur : Résidence étudiante de 45 chambres

Niveau 3

Appartement 3 chambres  
+ espace commun

Appartement 3 chambres  
+ espace commun



Appartement 1 chambre  
+ appartement 2 chambres

Appartement 1 chambre

Appartement 1 chambre

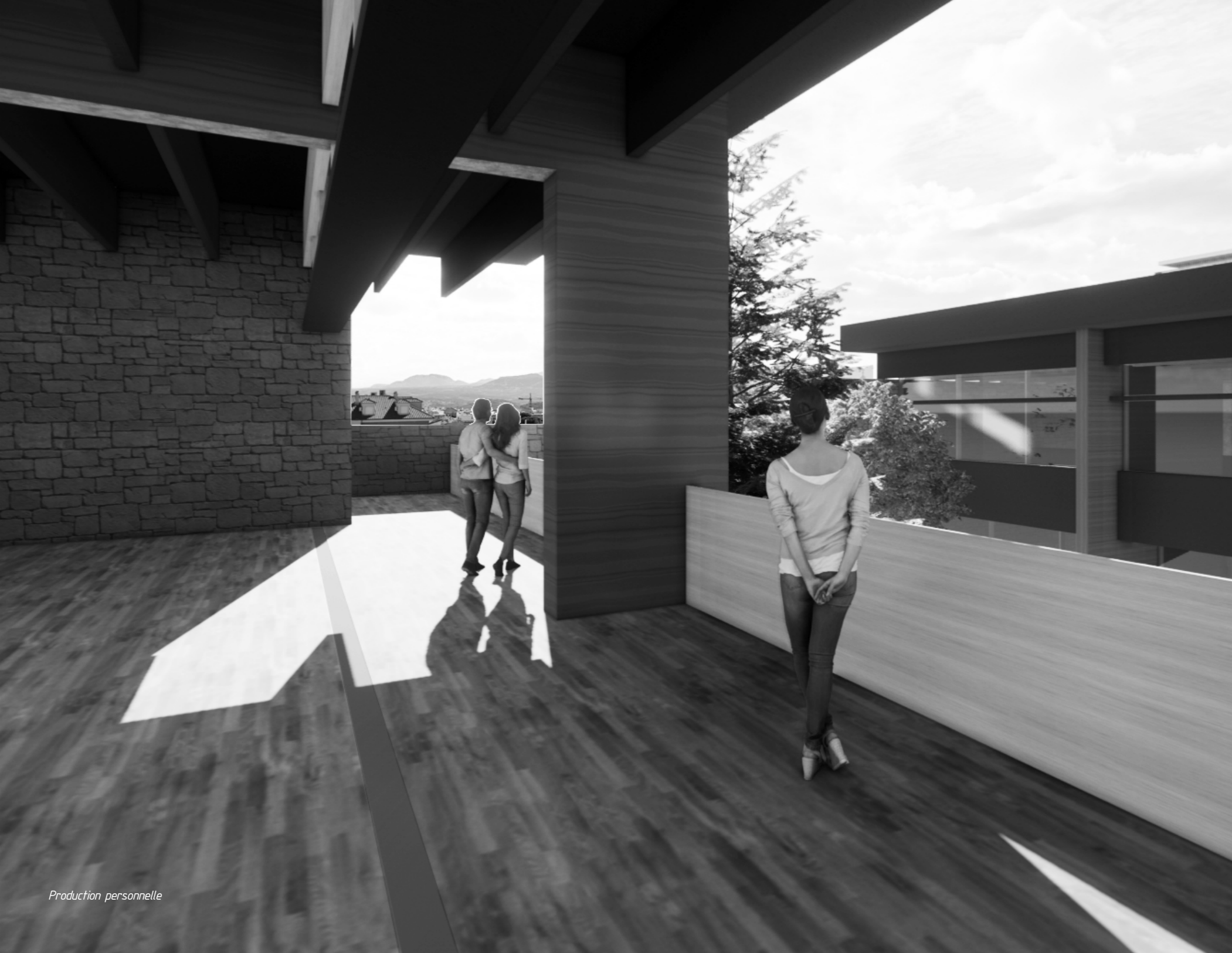
Appartement 1 chambre

Appartement 1 chambre

Appartement 1 chambre

Appartement 1 chambre

Balcon



## CONCLUSION

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique mondial, marqué par une intensification des vagues de chaleur, certains pays se retrouvent particulièrement vulnérables, faisant des épisodes caniculaires un enjeu majeur de santé publique. C'est notamment le cas de l'Espagne où il devient essentiel pour les habitants de revoir leur mode de vie pour s'adapter aux nouveaux défis climatiques auxquels ils sont confrontés. Cette adaptation passe en premier lieu par la manière dont nous concevons nos espaces de vie.

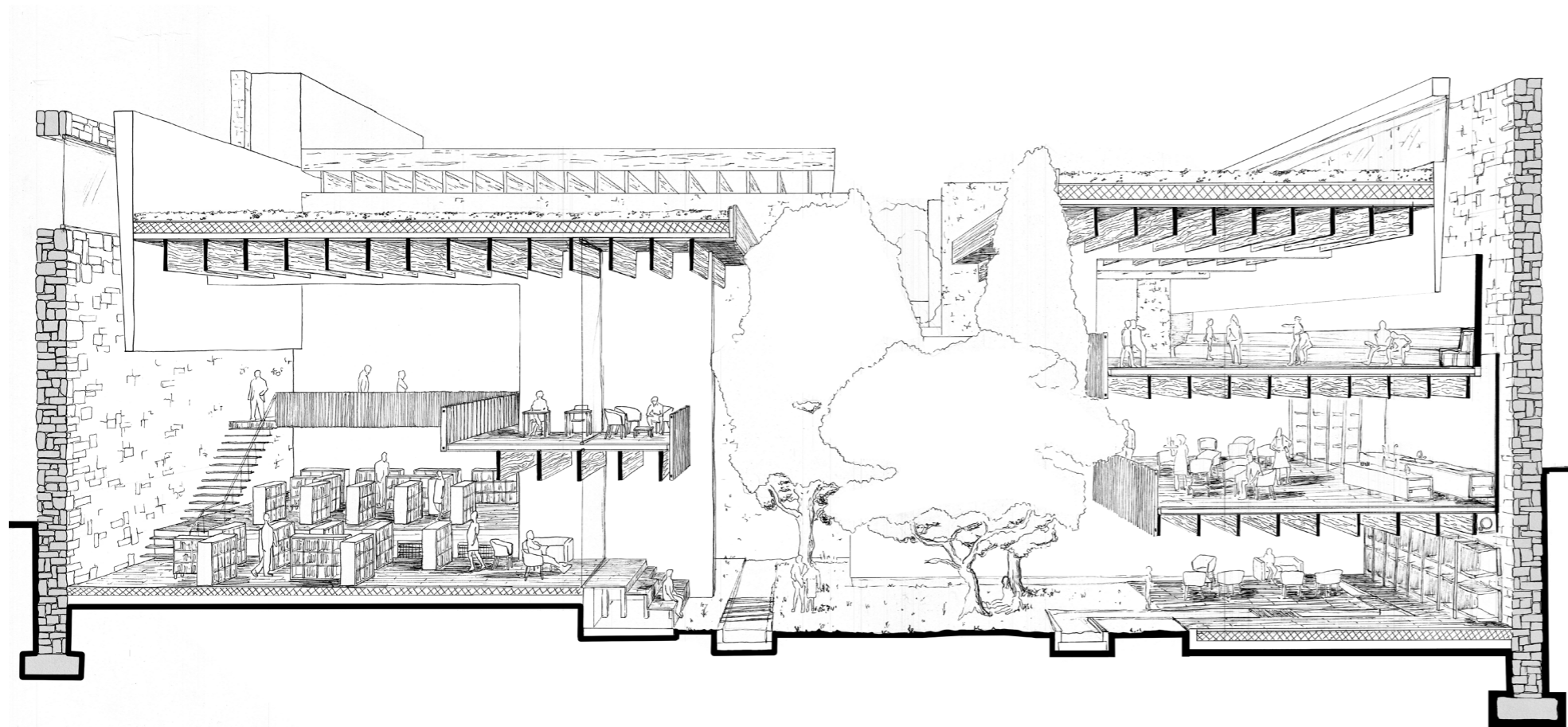
Le constat est clair. Les villes sont de plus en plus vulnérables aux fortes chaleurs, à cause de l'artificialisation des sols et de la dévégétalisations des espaces urbains, qui en font de véritables fours l'été. De plus, tous les habitants ne sont pas égaux face à la chaleur : il y a des personnes beaucoup plus fragiles et beaucoup plus exposées que d'autres, même au sein d'une même ville. C'est dans ce cadre que le concept de refuge climatique prend tout son sens.

Ce mémoire s'est interrogé sur ce concept, non pas comme une réponse technique isolée, mais comme le point de départ d'une réflexion architecturale plus large, intégrant des logiques bioclimatiques pour tenter de répondre aux enjeux environnementaux et sociaux auxquels nous faisons face.

En s'implantant à Jaén, dans le sud de l'Espagne, au sein d'un tissu urbain dense et chargé d'histoire, le projet de refuge climatique s'inscrit dans un environnement chaud et sec. Il vise à offrir aux habitants marginalisés un espace d'accueil à la fois protecteur, inclusif et adapté aux défis climatiques. Le choix du site témoigne également d'une volonté de répondre à une urgence sociale, en mettant l'architecture au service des plus vulnérables. Il ne s'agit pas seulement d'un espace de repli face aux épisodes caniculaires, mais d'un lieu collectif vivant, conçu pour favoriser la mixité des usages et redynamiser le quartier. Plus qu'un simple abri temporaire, le projet s'affirme comme un véritable équipement urbain pour la communauté locale. Ainsi, le programme conçu vise à offrir aux habitants une diversité d'activités réparties dans des espaces variés, allant des zones plus ouvertes et collectives à des lieux plus intimes et réservés. Cette combinaison permet à chaque usager de trouver un cadre qui lui correspond, favorisant ainsi un sentiment d'appartenance et de bien-être au sein du refuge climatique.

Seulement, l'enjeu du projet n'est pas uniquement de créer des espaces d'accueil qui restent frais, mais de le faire en mobilisant le moins de ressources énergétiques possible. De cette manière, le projet cherche à proposer un modèle de référence reproductible à l'échelle de l'îlot dans la ville tout en s'intégrant à l'existant.

En effet, lorsqu'on prend du recul sur le secteur de la construction, on constate qu'il fait partie des plus grands émetteurs de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, ce qui lui fait participer au réchauffement global. Il faut donc questionner les fondements mêmes des pratiques architecturales. L'uniformisation des modes constructifs, l'utilisation de matériaux importés et carbonés, ainsi que la dépendance généralisée aux systèmes mécaniques de chauffage ou de climatisation constituent des impasses écologiques.



Face aux impacts négatifs engendrés par ces méthodes, il devient indispensable d'adopter une démarche qui intègre pleinement les spécificités environnementales et culturelles propres à chaque lieu, afin de concevoir des constructions capables de s'adapter durablement aux conditions climatiques et de minimiser leur empreinte écologique.

La solution ne peut venir que d'une réinvention du rapport au climat, au site, et aux ressources locales, c'est-à-dire une architecture bioclimatique profondément contextuelle.

La disposition des systèmes passifs de rafraîchissement, pour certains issus des traditions vernaculaires méditerranéennes, prouve qu'il est possible de concevoir des bâtiments confortables sans climatisation mécanique ou autre système énergivore, même dans les régions les plus chaudes.

Le projet s'inscrit également dans une démarche circulaire et évolutive. Sa structure permet une flexibilité d'usage dans le temps, favorisant une longévité architecturale et réduisant l'empreinte carbone associée aux reconversions futures. Les matériaux choisis – la pierre, la terre crue et le bois local – ont été sélectionnés non seulement pour leurs qualités thermiques et leur faible impact environnemental, mais aussi pour leur ancrage culturel et leur disponibilité régionale. Cette approche démontre que la sobriété constructive peut rimer avec esthétique, fonctionnalité et insertion harmonieuse dans le paysage urbain. Ainsi, ce mémoire a permis de montrer que la création de refuges climatiques, loin d'être une réponse isolée à un phénomène conjoncturel, peut devenir un levier pour transformer notre manière de concevoir le bâti, en réconciliant architecture, écologie et justice sociale. Le projet développé à Jaén illustre concrètement cette ambition : proposer une architecture low-tech, respectueuse du contexte, ouverte à la mixité d'usages, et surtout résiliente face aux défis du XXI<sup>ème</sup> siècle.

Les enseignements tirés de ce projet dépassent largement le cadre géographique ou programmatique du mémoire. Ils soulignent une évidence incontournable : l'architecture bioclimatique ne doit plus être une alternative, mais la norme. Dans un monde confronté à la crise énergétique, à la raréfaction des ressources et à l'urgence climatique, il est impératif de généraliser des modes de construction sobres, adaptatifs et localement enracinés. Concevoir en bioclimatique, ce n'est pas seulement intégrer quelques dispositifs passifs ; c'est repenser l'ensemble du processus architectural, depuis le choix du site jusqu'aux usages futurs du bâtiment.

Le refuge climatique, tel que développé dans ce mémoire, n'est qu'un exemple parmi tant d'autres possibles. Il incarne une vision dans laquelle le bâtiment n'est plus une machine consommatrice d'énergie, mais un organisme vivant, en interaction avec son milieu, pensé pour durer, s'adapter et protéger.

## Bibliographie

H. Fathy, « Construire avec le peuple », Sindbad, 1969, Consulté le 16 octobre 2023.

X. Thyssen, « Des manières d’habiter dans le Sahel Tunisien », CNRS Edition, 1983, Consulté le 25 octobre 2023.

## Sitographie

DONAIRE, Ginés, 2003. El paro en el casco antiguo de Jaén es del 30%, el doble que en toda la capital. El País [en ligne]. Madrid, 15 septembre 2003.  
Disponible à l’adresse : [https://elpais.com/diario/2003/09/15/andalucia/1063578124\\_\\_850215.html](https://elpais.com/diario/2003/09/15/andalucia/1063578124__850215.html) [Consulté le 5 mai 2025].

Un estudio alerta del elevado analfabetismo y la inseguridad  
DONAIRE, Ginés, 2006. El casco antiguo jiennense recobra población pese al paro y el analfabetismo. El País [en ligne]. Madrid, 31 mai 2006.  
Disponible à l’adresse : [https://elpais.com/diario/2006/05/31/andalucia/1149027732\\_\\_850215.html](https://elpais.com/diario/2006/05/31/andalucia/1149027732__850215.html) [Consulté le 5 mai 2025].

Estudio demografico completo de Jaén  
JAEN@IDEALES, MÓNICA LOPERA, 2011. San Juan, casco antiguo de Jaén que se siente olvidado. Ideal [en ligne]. 14 novembre 2011.  
Disponible à l’adresse : [https://www.ideal.es/jaen/v/20111114/jaen/juan-casco-antiguo-jaen-20111114.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.ideal.es/jaen/v/20111114/jaen/juan-casco-antiguo-jaen-20111114.html?utm_source=chatgpt.com) [Consulté le 5 mai 2025].

Naissance et évolution du Bioclimatique à l’ENSA de Toulouse (1974–1990)  
CTE espagne, [sans date]. [en ligne].  
Disponible à l’adresse : <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html> [Consulté le 31 janvier 2025].

Effects of extreme heat on the body | News, 2024. Wellcome [en ligne].  
Disponible à l’adresse : <https://wellcome.org/news/how-does-extreme-heat-affect-health> [Consulté le 22 février 2025].

Extreme heat, or heatwaves, are becoming more frequent and intense due to the climate crisis. We look at how extreme heat is affecting human health.  
El Casco Histórico de la Villa no quiere morir solo, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l’adresse : <https://vivajaen.es/jaen/26932/el-casco-historico-de-la-villa-no-quiere-morir-solo/> [Consulté le 31 mai 2025].

Los vecinos de la Villa ?huyen? hacia los sectores este y norte, provocando su despoblación En el 26% de los hogares de la ciudad de Jaén solo vive una persona, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://andaluciainformacion.es/jaen/981505/en-el-26-de-los-hogares-de-la-ciudad-de-jaen-solo-vive-una-persona/> [Consulté le 31 mai 2025].

Nueva entrega de EXTRA JAÉN, que pueden descargar al final de la noticia en pdf Espagne, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/observatory/policy-context/country-profiles/spain> [Consulté le 30 mai 2025].

GUÉRINEAU, Valentin, 2022. Chaleurs urbaines, la considération des îlots de chaleur urbains dans les projets d'aménagement : certitudes, doutes et nouvelles manières de vivre l'espace public. . 2022. pp. 119.

HAO, Shimeng, YU, Changming, XU, Yuejia et SONG, Yehao, 2019. The Effects of Courtyards on the Thermal Performance of a Vernacular House in a Hot-Summer and Cold-Winter Climate. Energies. janvier 2019. Vol. 12, n° 6, pp. 1042. DOI 10.3390/en12061042. Consulté le 30 mai 2025].

Jaén (Andalousie, Espagne) - Statistiques démographiques, graphiques, carte, localisation, météo et informations web, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : [https://citypopulation.de/en/spain/andalucia/ja%C3%A9n/23050\\_\\_\\_ja%C3%A9n/?utm\\_source=chatgpt.com](https://citypopulation.de/en/spain/andalucia/ja%C3%A9n/23050___ja%C3%A9n/?utm_source=chatgpt.com) [Consulté le 30 mai 2025].

OC, Envirobat, 2024. ETUDE : « Architecture & Changement Climatique » Jean Pierre CORDIER etude vitrage/local. Envirobat Oc [en ligne]. 4 juillet 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.envirobat-oc.fr/ETUDE-Architecture-Changement-Climatique> [Consulté le 31 janvier 2025].

Pourquoi la construction en pisé est-elle à nouveau de l'ordre du jour, [sans date]. <https://deavita.fr/> [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://deavita.fr/maison/construction-pise-projets-emblematisques/> [Consulté le 31 mai 2025].

UNIVERSITY OF ILLINOIS EXTENSION (réal.), 2014. Rain Shadow [en ligne]. 7 décembre 2014. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=iMu4dShS74w> [Consulté le 30 mai 2025].

AMORIM-MAIA, Ana Terra et OLAZABAL, Marta, 2023. Refugios climáticos sí, pero ¿cómo deberían ser? The Conversation [en ligne]. 22 juin 2023. Disponible à l'adresse : <http://theconversation.com/refugios-climaticos-si-pero-como-deberian-ser-206818> [Consulté le 24 avril 2024].

BBVA, [sans date]. ¿Qué es un refugio climático? Espacios para protegerse de situaciones extremas | BBVA. BBVA NOTICIAS [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-un-refugio-climatico-espacios-para-protegerse-de-situaciones-extremas/> [Consulté le 24 avril 2024].

¿Qué es un refugio climático? | Escola Sert, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.escolasert.com/es/blog/que-son-refugios-climaticos> [Consulté le 24 avril 2024].

Qu'est-ce qu'un abri climatique ? - Blog CREAM, 2022. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://blog.creaf.cat/es/conocimiento/que-es-un-refugio-climatico/> [Consulté le 24 avril 2024].

Architecture bioclimatique - Définition et Explications, [sans date]. Techno-Science.net [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Architecture-bioclimatique.html> [Consulté le 24 février 2024].

Un habitat bioclimatique est un bâtiment dans lequel le chauffage et la climatisation sont réalisés en tirant le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation... ASSOCIATIONARCANNE, 2018. La conception bioclimatique. Association Arcanne [en ligne]. 18 juillet 2018. Disponible à l'adresse : <https://associationarcanne.com/2018/07/18/la-conception-bioclimatique/> [Consulté le 24 février 2024].

Clément Gaillard | Qu'est-ce que la conception bioclimatique ?, [sans date]. [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://www.clementgaillard.com/articles/blog/conception-bioclimatique/qu-est-ce-que-la-conception-bioclimatique-architecture-urbanisme-definition> [Consulté le 24 février 2024].

DIMITRI, Toubanos, 2019. L'évolution historique du rapport entre l'architecture et l'écologie. Transversale. Histoire : architecture, paysage, urbain [en ligne]. décembre 2019.  
Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-03864146> [Consulté le 24 février 2024].

Les principes de base d'une conception bioclimatique, [sans date]. Bureau d'études thermiques RT2012 en ligne [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/> [Consulté le 24 février 2024].

Maison Bioclimatique : Les 14 principes de la conception bioclimatique, [sans date]. [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/renovation-energetique-habitat-durable/la-conception-bioclimatique-en-renovation> [Consulté le 24 février 2024].

ABIERTO, Oficina de Transparencia y Gobierno, [sans date]. Visor temperatura superficial. Ayuntamiento de Zaragoza. [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://www.zaragoza.es/sede/portal/idezar/mapa/islas-de-calor/> [Consulté le 8 mars 2024].

ALMOGUERA, Pablo D., 2022. 'Oasis' de sombra contra el terral: Málaga impulsa un Plan de Refugios Climáticos. *elconfidencial.com* [en ligne]. 19 avril 2022.  
Disponible à l'adresse : [https://www.elconfidencial.com/espana/andalucia/2022-04-19/medioambiente-propuestas-calor-malaga\\_3410250/](https://www.elconfidencial.com/espana/andalucia/2022-04-19/medioambiente-propuestas-calor-malaga_3410250/) [Consulté le 18 mars 2024].

Aplicación para la descarga y visualización de escenarios climáticos regionalizados para Andalucía, [sans date]. [en ligne].  
Disponible à l'adresse : [https://kerdoc.cica.es/cc?lr=lang\\_es](https://kerdoc.cica.es/cc?lr=lang_es) [Consulté le 18 mars 2024].

BALISTROU, Par Camélia, 2022. Vague de chaleur : quels sont quartiers les plus frais de Barcelone ? [en ligne]. 11 juillet 2022.  
Disponible à l'adresse : <https://www.equinoxmagazine.fr/2022/07/11/les-quartiers-les-plus-frais-de-barcelone/> [Consulté le 28 février 2024].

CaixaForum Málaga: un refugio climático dedicado a la cultura, el arte y la ciencia, 2024. *www.laopiniondemalaga.es* [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://www.laopiniondemalaga.es/malaga/2024/01/12/caixaforum-malaga-refugio-climatico-dedicado-96791428.html> [Consulté le 18 mars 2024].

El Clima de Sevilla – Clasificación y Aspectos Generales | El Tiempo en Sevilla – *stores.best2024cheap.ru*, [sans date]. [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://stores.best2024cheap.ru/content?c=temperatura+media+andalucia&id=25> [Consulté le 8 mars 2024].

Bioclimas de Andalucía para el periodo 1961-2000., [sans date]. *ResearchGate* [en ligne].  
Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/figure/Bioclimas-de-Andalucia-para-el-periodo-1961-2000\\_fig8\\_264166578](https://www.researchgate.net/figure/Bioclimas-de-Andalucia-para-el-periodo-1961-2000_fig8_264166578) [Consulté le 18 mars 2024].

HOY, Granada, 2024. La Alpujarra, refugio de Andalucía frente a la torridez del verano. *Granada Hoy* [en ligne]. 18 mars 2024.  
Disponible à l'adresse : [https://www.gradahoy.com/granada/Alpujarra-refugio-Andalucia-torridez\\_0\\_1881712913.html](https://www.gradahoy.com/granada/Alpujarra-refugio-Andalucia-torridez_0_1881712913.html) [Consulté le 18 mars 2024].

M, A., 2017. La localidad cordobesa de Montoro bate el récord de España de calor con 47,3o. *www.elperiodico.com* [en ligne]. 14 juillet 2017.  
Disponible à l'adresse : <https://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20170714/montoro-cordoba-bate-record-espana-calor-6168358> [Consulté le 8 mars 2024].

Mapa de calor para Sevilla, [sans date]. meteoblue [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.meteoblue.com/es/products/cityclimate/heatmaps/seville> [Consulté le 8 mars 2024].

Mapa-CLIMA – Portal Ambiental de Andalucía, [sans date]. CMAOT [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/cambio-climatico-y-clima/escenarios-locales-de-cambio-climatico/mapa-clima> [Consulté le 8 mars 2024].

¿Qué son los Escenarios Locales de Cambio Climático de Andalucía? – Cambio Climático – CMAOT, [sans date]. Cambio Climático [en ligne].

Disponible à l'adresse : [https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/web/cambio-climatico/indice/-/asset\\_publisher/hdxWUGtQGkX8/content/metodolog-c3-ada-para-la-elaboraci-c3-b3n-de-escenarios-locales-de-cambio-clim-c3-a1fco-de-andaluc-c3-ada/20151](https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/web/cambio-climatico/indice/-/asset_publisher/hdxWUGtQGkX8/content/metodolog-c3-ada-para-la-elaboraci-c3-b3n-de-escenarios-locales-de-cambio-clim-c3-a1fco-de-andaluc-c3-ada/20151) [Consulté le 18 mars 2024].

Refugios climáticos | Biodiversidad 2022, [sans date]. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2022/cap2/203/> [Consulté le 18 mars 2024].

SEVILLA, Diario de, 2022. El Ayuntamiento de Sevilla habilita tres refugios climáticos de cara la próxima ola de calor. Diario de Sevilla [en ligne]. 29 juillet 2022.

Disponible à l'adresse : [https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Ayuntamiento-Sevilla-habilita-refugios-climaticos-calor\\_0\\_1706230661.html](https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Ayuntamiento-Sevilla-habilita-refugios-climaticos-calor_0_1706230661.html) [Consulté le 18 mars 2024].

SOFTWARE, Dlubal, 2024. Moins, c'est plus : Architecture low-tech. Dlubal Software [en ligne]. 7 mars 2024.

Disponible à l'adresse : <https://www.dlubal.com/fr/actualites-et-evenements/actualites/blog/000147> [Consulté le 17 juin 2024].

Architecture et confort thermique en climat aride : le cas du Maroc par benchemsi aida – Issuu, 2019. [en ligne].

Disponible à l'adresse : [https://issuu.com/benchemsi-aida/docs/aida\\_benchemsi\\_m\\_moire\\_tfe\\_copie\\_2](https://issuu.com/benchemsi-aida/docs/aida_benchemsi_m_moire_tfe_copie_2) [Consulté le 28 octobre 2023].

AYEN, Écrit par Francisco, [sans date]. Tiempo y clima en España. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.profesorfrancisco.es/2009/11/el-clima-en-espana.html> [Consulté le 29 décembre 2023].

BÂTIMENT (CTB), Cahiers Techniques du, 2023. Matériau : le nouvel âge de pierre du bâtiment – Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB). [en ligne]. 6 mai 2023.

Disponible à l'adresse : [https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/le-nouvel-age-de-pierre-du-batiment.67964?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/le-nouvel-age-de-pierre-du-batiment.67964?utm_source=chatgpt.com) [Consulté le 19 mai 2025].

BERMÚDEZ, Francisco López, 1996. Érosion hydrique, désertification et aménagement dans l'environnement méditerranéen semi-aride. EDITUM. ISBN 978-84-7684-759-6. [Consulté le 5 novembre 2023].

FONTEIX, Marie, 2020. Habiter le climat méditerranéen dans un contexte de réchauffement climatique. L'enveloppe, un élément de protection, un espace d'interactions. [Consulté le 5 novembre 2023].

HILL, Sean Ronnie, 2022. surchauffe et comment refroidir les bâtiments grâce à la conception architecturale | Blogue RISE. [en ligne]. 7 octobre 2022.

Disponible à l'adresse : <https://risedesignstudio.co.uk/blog/index.php/2022/10/07/overheating-and-how-to-cool-buildings-through-architectural-design/> [Consulté le 5 novembre 2023].

Homaj | Comment construire une maison bioclimatique ?, 2019. Homaj [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.homaj.fr/blog/2019/les-grands-principes-de-la-construction-bioclimatique/> [Consulté le 31 décembre 2023].

La chaleur extrême d'avril en Espagne, au Portugal, au Maroc et en Algérie est presque impossible sans changement climatique – World Weather Attribution, [sans date]. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.worldweatherattribution.org/extreme-april-heat-in-spain-portugal-morocco-algeria-almost-impossible-without-climate-change/> [Consulté le 1 janvier 2024].

LAURENT, Par Clémentine, 2022. 197 lieux ouverts pour échapper à la chaleur, à Barcelone. [en ligne]. 14 juin 2022.

Disponible à l'adresse : <https://www.equinoxmagazine.fr/2022/06/14/chaleur-barcelone/> [Consulté le 29 décembre 2023].

Le four ibérique et au-delà : les effets dévastateurs du climat sur no, 2023. TESUP [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.tesup.fr/blogs/blogs-sur-les-energies-renouvelables/le-four-iberien-et-au-dela-des-effets-devastateurs-du-climat-sur-notre-monde> [Consulté le 29 décembre 2023].

LEFEBVRE, Coentin, 2022. Développement des matériaux locaux dans la construction : Amélioration des constructions en matériaux locaux au Burkina Faso.

SERRANO-NOTIVOLI, Roberto, TEJEDOR, Ernesto, SARRICOLEA, Pablo, MESEGUER-RUIZ, Oliver, DE LUIS, Martín, SAZ, Miguel Ángel, LONGARES, Luis Alberto et OLCINA, Jorge, 2023. Unprecedented warmth: A look at Spain's exceptional summer of 2022. Atmospheric Research. 15 septembre 2023. Vol. 293, pp. 106931. DOI 10.1016/j.atmosres.2023.106931. [Consulté le 1 janvier 2024].

Spain is warming up quicker than the global average, Greenpeace warns, 2023. euronews [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.euronews.com/green/2023/07/06/spain-is-getting-hotter-drier-and-more-flammable-due-to-climate-change-greenpeace-warns> [Consulté le 1 janvier 2024].

UNIVERSALIS, Encyclopædia, [sans date]. CLIMATS (notions de base) : Les grands types de climats aujourd'hui. Encyclopædia Universalis [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/climats-notions-de-base/3-les-grands-types-de-climats-aujourd-hui/> [Consulté le 17 novembre 2023].

Architecture et confort thermique en climat aride : le cas du Maroc par benchemsi aida - Issuu, 2019. [en ligne].

Disponible à l'adresse : [https://issuu.com/benchemsi-aida/docs/aida\\_benchemsi\\_m\\_moire\\_tfe\\_copie\\_2](https://issuu.com/benchemsi-aida/docs/aida_benchemsi_m_moire_tfe_copie_2) [Consulté le 28 octobre 2023].

Climat de l'Espagne - Quirosimo, [sans date]. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.quirosimo.fr/climat.html> [Consulté le 30 novembre 2023].

Il existe trois grandes zones climatiques : le climat méditerranéen, le climat semi-aride et le climat océanique.

Climate of Spain, 2023. Wikipédia [en ligne]. Disponible à l'adresse : [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Climate\\_of\\_Spain&oldid=1185156387](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Climate_of_Spain&oldid=1185156387) [Consulté le 1 janvier 2024].

Climate Types for Kids | Arid Climate, [sans date]. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.climateforkids.com/fr/arid-climate> [Consulté le 17 novembre 2023].

CLIMATS - Encyclopédie météorologique, [sans date]. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.climats.com> [Consulté le 17 novembre 2023].

Guide pratique pour découvrir tous les climats et leurs conséquences.

DENIS, Par Clara, 2023. Une partie de l'Espagne pourrait se transformer en désert, la France est-elle aussi menacée ? - Edition du soir Ouest-France - 21/07/2023. Ouest-France.fr [en ligne]. 21 juillet 2023.

Disponible à l'adresse : <https://www.ouest-france.fr/leditiondusoir/2023-07-21/une-partie-de-l-espagne-pourrait-se-transformer-en-desert-la-france-est-elle-aussi-menacee-bbcf8a4f-9eb6-43eb-bdd1-8cb94db89c32> [Consulté le 30 novembre 2023].

Evaporation, Condensation, Clouds and Precipitation - ppt download, [sans date]. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://slideplayer.com/slide/14523321/> [Consulté le 1 janvier 2024].

La chaleur extrême d'avril en Espagne, au Portugal, au Maroc et en Algérie est presque impossible sans changement climatique - World Weather Attribution, [sans date]. [en ligne].

Disponible à l'adresse : <https://www.worldweatherattribution.org/extreme-april-heat-in-spain-portugal-morocco-algeria-almost-impossible-without-climate-change/> [Consulté le 1 janvier 2024].

Le four ibérique et au-delà : les effets dévastateurs du climat sur no, 2023. TESUP [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.tesup.fr/blogs/blogs-sur-les-energies-renouvelables/le-four-iberien-et-au-dela-des-effets-devastateurs-du-climat-sur-notre-monde> [Consulté le 29 décembre 2023].

MANDOUL, Thierry, 2012. Climat(s) : nouveau paradigme pour l'architecture ? Raison publique. 2012. Vol. 17, n° 2, pp. 141 161. DOI 10.3917/rpub.017.0141. [Consulté le 28 octobre 2023].

PÉTONNET, Colette, 1983. Préface. In : Des manières d'habiter dans le Sahel tunisien [en ligne]. Paris : CNRS Éditions. pp. 1 3. Cahiers du CRESM. ISBN 978-2-222-03249-6. Disponible à l'adresse : <https://www.cairn.info/des-manieres-d-habiter-dans-le-sahel-tunisien--9782222032496-p-1.htm> [Consulté le 28 octobre 2023].

PORTILLO, Germán, 2020. Climat aride: qu'est-ce que c'est, caractéristiques et conditions environnementales. Meteorología en Red [en ligne]. 30 octobre 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.meteorologiaenred.com/fr/Temps-sec.html> [Consulté le 17 novembre 2023].

Rain Shadow, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://education.nationalgeographic.org/resource/rain-shadow> [Consulté le 17 novembre 2023].

Record-breaking Heat in the Summer of 2022 Caused more than 61,000 Deaths in Europe, [sans date]. ISGLOBAL [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.isglobal.org/-/el-calor-record-del-verano-de-2022-causo-mas-de-61-000-muertes-en-europa> [Consulté le 1 janvier 2024].

SERRANO-NOTIVOLI, Roberto, TEJEDOR, Ernesto, SARRICOLEA, Pablo, MESEGUER-RUIZ, Oliver, DE LUIS, Martín, SAZ, Miguel Ángel, LONGARES, Luis Alberto et OLCINA, Jorge, 2023. Unprecedented warmth: A look at Spain's exceptional summer of 2022. Atmospheric Research. 15 septembre 2023. Vol. 293, pp. 106931. DOI 10.1016/j.atmosres.2023.106931. [Consulté le 1 janvier 2024].

Spain is warming up quicker than the global average, Greenpeace warns, 2023. euronews [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.euronews.com/green/2023/07/06/spain-is-getting-hotter-drier-and-more-flammable-due-to-climate-change-greenpeace-warns> [Consulté le 1 janvier 2024].

For every degree of global warming, Spain's climate warms by 1.5. UNIVERSALIS, Encyclopædia, [sans date]. CLIMATS (notions de base) : Les grands types de climats aujourd'hui. Encyclopædia Universalis [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/climats-notions-de-base/3-les-grands-types-de-climats-aujourd-hui/> [Consulté le 17 novembre 2023].

VITELLO, Connie, 2021. Low Carbon Countdown: Canada's Approach to Net Zero Buildings. The Environment Journal [en ligne]. 10 mai 2021. Disponible à l'adresse : <https://environmentjournal.ca/low-carbon-countdown-is-on-canadas-approach-to-net-zero-buildings/> [Consulté le 1 janvier 2024].

Comprendre la notion de carbone incorporé, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.sapabuildingsystem.com/fr-be/be/les-nouveautes/les-actualites/comprendre-la-notion-de-carbone-incorpore/> [Consulté le 28 novembre 2023 a].

Comprendre la notion de carbone incorporé, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.sapabuildingsystem.com/fr-be/be/les-nouveautes/les-actualites/comprendre-la-notion-de-carbone-incorpore/> [Consulté le 28 novembre 2023 b].

ECOBATI, 2023. L'impact pollution sur le secteur de la construction. [en ligne]. 18 avril 2023. Disponible à l'adresse : <https://ecobati.com/fr/news/view/825/limpact-pollution-sur-le-secteur-de-la-construction> [Consulté le 28 novembre 2023].

LEI, Bin, YANG, Wanying, YAN, Yusong, TANG, Zhuo et DONG, Wenkui, 2023. Carbon Emission Reduction Evaluation of End-of-Life Buildings Based on Multiple Recycling Strategies. Sustainability. janvier 2023. Vol. 15, n° 22, pp. 15711. DOI 10.3390/su152215711. [Consulté le 29 novembre 2023].

## Iconographie

Nous joindre | Carbocrete | Montréal, Canada, [sans date]. Carbocrete [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://carbocrete.com/fr/contact/> [Consulté le 28 novembre 2023].

Homaj | Comment construire une maison bioclimatique ?, 2019. Homaj [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://www.homaj.fr/blog/2019/les-grands-principes-de-la-construction-bioclimatique/> [Consulté le 31 décembre 2023].

Gallery of 345 Telenor Campus / Arcop (Pvt) Ltd. - 19, [sans date]. ArchDaily [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.archdaily.com/897638/345-telenor-campus-arcop-pvt-ltd/5b3d74e7f197cc122a0000cb-345-telenor-campus-arcop-pvt-ltd-image> [Consulté le 10 avril 2025].  
HILL, Sean Ronnie, 2022. surchauffe et comment refroidir les bâtiments grâce à la conception architecturale | Blogue RISE. [en ligne]. 7 octobre 2022.  
Disponible à l'adresse : <https://risedesignstudio.co.uk/blog/index.php/2022/10/07/overheating-and-how-to-cool-buildings-through-architectural-design/> [Consulté le 5 novembre 2023].

La terre battue comme matériau de construction, 2024. [en ligne].  
Disponible à l'adresse : <https://www.firstinarchitecture.co.uk/rammed-earth-construction/> [Consulté le 10 avril 2025].

Rammed\_Earth\_Wall\_Section\_-\_White.jpg (646x1000), [sans date]. [en ligne].  
Disponible à l'adresse : [https://images.adsttc.com/media/images/537a/b897/c07a/80d8/5900/004c/slideshow/Rammed\\_Earth\\_Wall\\_Section\\_-\\_White.jpg?1400551559](https://images.adsttc.com/media/images/537a/b897/c07a/80d8/5900/004c/slideshow/Rammed_Earth_Wall_Section_-_White.jpg?1400551559) [Consulté le 10 avril 2025].

### Pages 14 - 15

« Planisphère Köppen-Geiger »  
Auteur : *World Maps of Köppen-Geiger climate classification*

### Pages 16 - 17

« Fonctionnement de l'albédo »  
Source : *Greenly.earth, glossaire*  
url : <https://greenly.earth/glossaire>

« Avergae température 1850 - 2022 »  
Source : *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*  
url : <https://www.ipcc.ch/>

### Pages 18 - 19

« Emissions mondiales de CO<sub>2</sub> »  
Source : *International Energy Agency*  
url : <https://www.iea.org/>

### Pages 20 - 21

« Köppen-Geiger Espagne »  
Source : *World Maps of Köppen-Geiger climate classification*  
url : <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present>.

« Relief en Espagne »  
Source : *The distribution of the Genus Buthus in the Iberian peninsula, Inaturalist*  
url : <https://www.inaturalist.org/posts/74071-the-distribution-of-the-genus-buthus-in-the-iberian-peninsula-and-southern-france>

### Pages 24 - 25

« Part mondiale des émissions de CO2 dans le monde en 2021 »

Source : *UNEP, Building materials and the climate 2022*

url : <https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future>

### Pages 32 - 33

« Centre de la culture contemporaine de Barcelone »

Source : *Mairie de Barcelone*

url : <https://ajuntament.barcelona.cat/novaciutadania/fr/espace-daccueil-et-informations-de-base/vivre-a-bcn>

### Pages 34 - 35

« Indice de vulnérabilité au changement »

Source : *García-Sierra y Domene, 2022*

url : [https://www.researchgate.net/publication/372109189\\_Seeking\\_refuge\\_The\\_potential\\_of\\_urban\\_climate\\_shelters\\_to\\_address\\_intersecting\\_vulnerabilities](https://www.researchgate.net/publication/372109189_Seeking_refuge_The_potential_of_urban_climate_shelters_to_address_intersecting_vulnerabilities)

« Emplacement des refuges climatiques dans le Ciutat Vella »

Source : *Mairie de Barcelone*

url : <https://ajuntament.barcelona.cat/novaciutadania/fr/espace-daccueil-et-informations-de-base/vivre-a-bcn>

### Pages 36 - 37

« Stratégie Blue/Green/Grey appliqué à l'école Rius i Taulet »

Source : *UUIA - Urban Innovative Actions, 2020*

url : <https://www.uia-initiative.eu/>

### Pages 38 - 39

« Incofort ressentie et refuges accessibles »

Source : *Seeking refuge?, A. T. Amorim-Maia, I. Anguelovski, J. Connolly, E. Chu, 2022*

url : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920462300155X>

### Pages 40 - 41

« Refuge climatique idéal »

Source : *A.T. Amorim Maia, BNUEJ - Barcelona Urban, 2023*

url : <https://www.bcnuej.org/projects/a-guide-to-creating-inclusive-and-effective-climate-shelters/>

### Pages 42 - 43

« Moyenne du nombre de jours supérieurs à 35°C en Andalousie »

Source : *Atlas Climático Ibérico, Agencia Estatal de Meteorología, 2011*

url : [https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos\\_en\\_linea/publicaciones\\_y\\_estudios/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf](https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf)

### Pages 48 - 49

« Jaén 1900 »

Source : *Andalucía informacion*

url : <https://andaluciainformacion.es/?hemeroteca-articulo=1&q=JAEN+1900>

« Champ d'oliviers, Jaén »

Source : *La croix, L'olive, l'« or jaune » de Jaén, en Andalousie, 2018*

url : <https://www.la-croix.com/Culture/Art-de-vivre/Lolive-jaune-Jaen-Andalousie-2018-06-10-1200945844>

## Pages 50 - 51

« Densité de la population »

Source : *Andalucia informacion*

url : <https://andaluciainformacion.es/?hemeroteca-articulo=1&q=densit%C3%A9+de+la+population+ja%C3%A9n+>

## Pages 54 - 55

« Chancre urbain vieille ville »

Source : *earth*

url : [google.earth.com](https://google.earth.com)

## Pages 72 - 73

« Classement de différents matériaux de construction par inertie thermique »

Source : *Arktic, 2014*

url : <https://arktic.fr/ressources/inertie-thermique/>

## Pages 74 - 75

« Cour intérieure Alhambra à Grenade »

Source : *Alhambra.grenade*

url : <https://www.alhambradegranada.org/fr/>

## Pages 76- 77

« Nipah Mall, Makassar, Indonésie »

Source : *Kalsi building solutions*

url : <https://www.kalsi-building-solutions.com/en/project-gallery/indonesia-nipah-mall-makassar/122002/>

## Pages 80 - 81

« Conductivité thermique des sols en fonction de leur teneur en eau »

Source : *thèse Hullmuller*

url : <https://archipel.uqam.ca/2025/1/M9244.pdf>

« Température annuelle du sol »

Source : *B. Herzog, 2007*

url : <https://www.researchgate.net/profile/Bernd-Herzog>

« Efficacité annuelle d'un puits canadien à 3m de profondeur »

Source : *C. Mary, G. Cozian, 2016*

url : [https://www.researchgate.net/publication/281501596\\_La\\_reglementation\\_des\\_fonds\\_](https://www.researchgate.net/publication/281501596_La_reglementation_des_fonds_)

## Pages 82 - 83

« Système de refroidissement par cheminée solaire du lycée Charles de Gaulle de Damas »

Source : *Une approche pluridisciplinaire des cheminées solaires, T. Monfort-Ginet, 2017*

url : [https://fmglab.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/final\\_mc3a9moire\\_monfort.pdf](https://fmglab.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/final_mc3a9moire_monfort.pdf)

## Pages 84 - 85

« Différent niveaux de la cour »

Source : *Forma Autodesk*

url : <https://accounts.autodesk.com/>

logon?resume=%2Fas%2FqWoEr5ZPQY%2Fresume%2Fas%2Fauthorization.

« Albédo des matériaux de construction »

Source : *MATÉRIAUX, Bordeaux Métropole*

url : <https://www.bordeaux-metropole.fr/metropole/projets-en-cours/rayonnement-territoire/equipements-metropolitainsping&spentity=null#username>

## Pages 88 - 89

« Trajectoire du soleil »

Source : *Sun earth tools*

url : [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=frping&spentity=null#username](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=frping&spentity=null#username)

« Albédo des matériaux de construction »

Source : *MATÉRIAUX, Bordeaux Métropole*

url : <https://www.bordeaux-metropole.fr/metropole/projets-en-cours/rayonnement-territoire/equipements-metropolitainsping&spentity=null#username>

## Pages 92 - 93

« Précipitation moyenne par année à Jaén »

Source : *asajajaen, pluviometria*

url : <https://www.asajajaen.com/tag/pluviometria>

## Pages 94- 95

« Classement des espèces en fonction de leur consommation en eau »

Source : *tudes en agroforesterie écophysiologie sur la consommation d'eau des arbres, FAO, INRAE*

url : <https://www.inrae.fr/actualites/agroforesterie-arbres-agriculture-durable>

## Pages 100 - 101

« Direction du vent sur site »

Source : *Forma Autodesk*

url : <https://accounts.autodesk.com/>

« Système de ventilation par captation du vent dans les Badgirs iraniens »

Source : *Une approche pluridisciplinaire des cheminées solaires, T. Monfort-Ginet, 2017*

url : [https://tmglab.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/final\\_mc3a9moire\\_monfort.pdf](https://tmglab.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/final_mc3a9moire_monfort.pdf)

## Pages 104 - 105

« Zone de confort hygrothermique »

Source : *Construire confortable, Bluetek, de nature à créer le bien être, 2019*

url : <https://www.bluetek.fr/fr/%C3%A9clairage-naturel>

## Pages 114 - 115

« Norme EN 17037 »

Source : *GRO, référentiel belge de durabilité, 2020*

url : <https://gro-tool.be/?lang=frping&spentity=null#username>

## Pages 122 - 123

« Nk MIP Desert Cultural Centre »

Source : *Devita, construction en terre crue*

url : <https://guidebatimentdurable.brussels/construction-terre-crue>



