

+2°C

CONCEVOIR L'INCERTAIN



2022, Sébastien Léveillé

Ce document est mis à disposition selon les termes de la Licence
Creative Commons Attribution
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Les contenus provenant de sources externes ne sont pas soumis à
la licence CC BY et leur utilisation nécessite l'autorisation de leurs
auteurs.

CONCEVOIR L'INCERTAIN

Sébastien Léveillé

Énoncé théorique de master
EPFL ENAC SAR

Janvier 2022

Directeur pédagogique : Prof. Emmanuel Rey
Professeur : Prof. Marilyne Andersen
Maître EPFL : Sophie Lufkin



SOMMAIRE

AVANT PROPOS

CHANGEMENT CLIMATIQUE

p. 15 le cri d'alerte

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

p. 21 qu'est ce qu'un gaz à effet de serre?
p. 23 contexte mondial
p. 27 contexte suisse
p. 29 le secteur du bâtiment
p. 33 synthèse : quand les climatiseurs nous réchauffent

OBSERVATIONS ACTUELLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

p. 37 contexte mondial
p. 41 contexte suisse
p. 49 synthèse : quand l'homme chamboule tout

OBSERVATIONS FUTURES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

p. 53 contexte mondial
p. 57 contexte suisse
p. 67 synthèse : quand l'homme continue de tout chambouler

CONSTAT POLITIQUE

p. 71 politique climatique suisse et internationale
p. 75 politique climatique vaudoise et lausannoise
p. 79 synthèse : la politique climatique

PROBLÉMATIQUE

p. 83 et si le CO₂ initiait une prise de conscience architecturale?
p. 86 plan et méthodologie



ARCHITECTURE DURABLE

- p. 91 la terre finie
- p. 93 réinventer l'existant
- p. 97 à la recherche de simplicité

CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

- p. 103 les espaces comme micro-climats
- p. 105 la thermodynamique des fluides comme outil architectural
- p. 107 des stratégies comme mode de vie

DISSIPER

- p. 115 pourquoi une ventilation naturelle?
- p. 117 ventilation par effet de cheminée
- p. 119 ventilation par le vent
- p. 123 stratification thermique
- p. 125 stockage thermique

RAFRAÎCHIR

- p. 131 rafraîchissement nocturne par convection
- p. 133 rafraîchissement nocturne par radiation
- p. 135 puits climatique
- p. 137 rafraîchissement adiabatique
- p. 141 rafraîchissement par évapotranspiration

ÉTUDE DE CAS

- p. 145 l'économie d'énergie par l'économie de moyens :
logements les grands-chênes, bunq architectes
- p. 153 la stratification thermique comme vecteur spatial :
appartement convectifs, Philippe Rahm architectes
- p. 161 îlot de fraîcheur urbain :
vision, l'eau de Bordeaux et LyRE

- p. 171 **CONCLUSION : L'ARCHITECTURE DOIT RENOUER AVEC LE CLIMAT**

HABITER L'INCERTAIN

- p. 179 Lausanne
- p. 181 un scénario climatique pour Lausanne
- p. 183 un nouveau tramway pour l'ouest lausannois
- p. 189 Lausanne en surchauffe
- p. 191 un site à fort potentiel
- p. 195 accéder au site
- p. 197 programme

- p. 203 **BIBLIOGRAPHIE**

AVANT-PROPOS



AVANT-PROPOS

J'ai la chance de faire partie une famille où les histoires à raconter pendant les repas de fêtes ne manquent pas. Mon grand père maternel, ingénieur électrotechnicien, a travaillé une grande partie de sa vie à l'étranger. Dans notre famille, Noël ne se fête pas sans feu de cheminée, même en étant à Taïwan par plus de 20°C à l'extérieur. Supporter une source de chaleur supplémentaire? Inconcevable! Mieux vaut allumer la climatisation pour faire descendre la température et apprécier ce feu de bois.

Aujourd'hui, cette histoire semble absurde et pourtant. Entre temps, la responsabilité de l'homme dans le changement climatique a été établie et une prise de conscience climatique apparaît. Habiter et construire de manière durable restent des domaines encore trop peu exploités. Cet énoncé théorique me semble être une recherche fondamentale, afin de pouvoir sensibiliser, imaginer et concevoir un avenir meilleur de façon consciente. Un architecte ne construit pas seulement pour le présent, mais aussi pour le futur. Connaître le climat auquel il faudra faire face, les besoins futurs de ses habitants et les solutions architecturales à sa disposition me semblent indispensables.

Ainsi, cet ouvrage se veut être un petit manuel de conception de l'incertain, destiné à tout architecte, urbaniste ou curieux, voulant construire un avenir meilleur.

CHANGEMENT CLIMATIQUE



CHANGEMENT CLIMATIQUE

LE CRI D'ALERTE

+2°C est pour beaucoup un simple chiffre, pour d'autres une évidence et pour certain une opportunité. Pour vous, je vous souhaite qu'il soit source de questionnement. A l'heure où l'absurdité du tourisme spatial et sa pollution engendrée se concrétise, d'autres questions restent en suspens : quel avenir pour notre planète? comment agir contre le dérèglement climatique? qui endosse la responsabilité? +1.5°C? +2°C? +6°C? que faut-il croire? Voici des questions parmi tant d'autres.

Aujourd'hui, le temps presse. Les rapports du GIEC^[1] confirment la responsabilité humaine dans le dérèglement global. Les climatosceptiques sont à court d'arguments, face à plus de 15'000 scientifiques qui affirment: « Il sera bientôt trop tard pour dévier de notre trajectoire vouée à l'échec, et le temps presse. »^[2]

Pour stabiliser le climat, une solution : il faut changer nos habitudes, afin de «ramener à zéro les émissions nettes de CO₂» (M. Zhai^[3]). Mais changer quoi exactement? Les médias, les politiques, les commerces, notre entourage nous assomme de directives et *bons plans écolos*. Mais connaissez-vous votre propre impact sur la planète?

Avant de poursuivre votre lecture, je vous invite à calculer votre propre empreinte écologique au travers du calculateur mis à disposition par WWF: <https://www.wwf.ch/fr/vie-durable/calculateur-d-empreinte-ecologique>.

Selon le calculateur WWF, il me faudrait 2.07 planètes avec mon mode de vie actuel où je fais pourtant des efforts. Ceci-correspond à des émissions de 9.01 tonnes d'équivalent CO₂ par an. Je pourrai presque passer pour un bon élève face à une moyenne suisse de 13.51 t eqCO₂/an, ce qui est



[1] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

[2] manifeste signé par 15 364 scientifiques, « Avertissement à l'humanité », BioScience, nov. 2017

[3] co-président du Groupe de travail I du GIEC, dans GIEC/OMM, « Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante », Genève, Suisse, communiqué de presse, août 2021.

Votre empreinte personnelle

Bravo! Vous êtes bien meilleur(e) que la moyenne suisse. Nos écoconseils sont là pour vous permettre de réduire encore votre empreinte. Vous pouvez également parler autour de vous de ce que vous faites afin de convaincre d'autres personnes de changer peu à peu de mode de vie.

Votre résultat en équivalent CO₂ par an

9.01 tonnes

Moyenne suisse en équivalent CO₂ par an

13.51 tonnes

Moyenne mondiale en équivalent CO₂ par an

7.41 tonnes

*Calculs effectués par ESU-services 2018: esu-services.ch

Si l'ensemble de la population mondiale vivait de manière aussi exemplaire, nous n'aurions besoin que de

2.07 Planètes

Malheureusement, nous n'avons que celle-ci.

colossal comparé à la moyenne mondiale de 7.41 t eqCO₂/an.^[4]

Dans la course à celui qui rejettera le moins de CO₂, nous constaterons une chose. Personne d'entre nous ne pourra se contenter de moins d'une planète. Pourquoi une telle fatalité? La réponse est simple. Nos efforts au quotidien sont importants, mais la face cachée de notre consommation l'est bien plus. Ce sont des types de pollution causés par l'ensemble de la population, principalement issus du secteur du bâtiment et des services publics, qui en sont la cause.^[5]

fig. 1 :
mon empreinte
carbone personnelle

Chauffer, ventiler et climatiser des bâtiments semble aujourd'hui une évidence, à tel point qu'on en oublie leur présence. La consommation d'énergie des bâtiments pour leur bon fonctionnement, l'énergie opérative, est pourtant colossale. L'Office fédéral du Logement et l'Office fédéral de l'Environnement en sont conscients : 24% des impacts environnementaux en Suisse sont issus du secteur du bâtiment^[6]. En d'autres termes, un quart du problème se situe entre les mains des architectes.

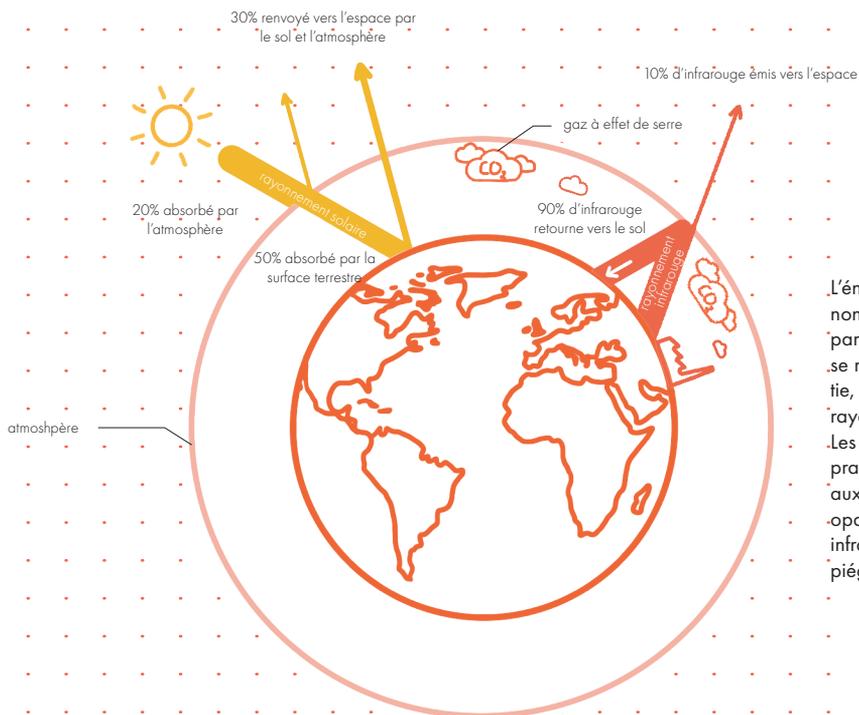
C'est donc ici que mon intérêt pour un avenir juste et durable rejoint celui de la discipline architecturale, me plaçant comme acteur au sein d'un futur incertain. Concevoir à un horizon 2030-2060 n'est pas seulement se confronter à un certain nombre de problèmes environnementaux et sociaux, mais c'est également une opportunité de construire un nouvel imaginaire. Voici donc les prémices, d'un petit manuel pour concevoir l'incertain.

[4] WWF, « Footprint - évaluation détaillée », déc. 2021, p.1

[5] WWF, « Footprint - évaluation détaillée », déc. 2021, p.4

[6] cf. figure 9

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE



L'énergie solaire non-réfléchiée est absorbée par la surface terrestre qui se réchauffe. En contrepartie, ces surfaces émettent un rayonnement infrarouge. Les gaz à effet de serre sont pratiquement transparents aux rayonnements solaires et opaques au rayonnement infrarouge. La chaleur est piégée.

En savoir plus :

Pour comparer les émissions de gaz à effet de serre actuelles et la hausse des températures, on utilise une période de référence *préindustrielle*. C'est une période où les très faibles émissions de l'homme n'avaient pas de conséquences sur l'environnement. C'est également une période pendant laquelle il n'y a pas eu d'événement climatique majeur, tel que des éruptions volcaniques ou âge glaciaire.

A l'échelle de la planète, cette période de référence pré-industrielle s'étend de 1850 à 1900. Mais pour la Suisse, une période de 1871 à 1900 a été retenue, car les données de mesures pour l'ensemble de la Suisse n'existent que depuis 1864. La différence de température entre ces deux périodes étant très faible, cela n'a aucune incidence sur le réchauffement mesuré.

source: NCCS, La période de référence préindustrielle, 2019, [En ligne Video]

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

QUE-EST CE QU'UN GAZ À EFFET DE SERRE?

fig. 2 : fonctionnement de l'effet de serre

Les gaz à effet de serre sont des gaz naturellement présents dans l'atmosphère. Le plus connu d'entre eux est le CO_2 . L'effet de serre est un phénomène en soit naturel, qui permet la vie sur Terre en conservant la chaleur provenant des rayons du soleil. Cependant, l'activité humaine perturbe son équilibre. En trop grande concentration, ces gaz conservent trop de chaleur et empêchent son renvoi dans l'espace, et la redirigent vers la terre, réchauffant ainsi sa surface.

En réalité, il existe d'autres gaz à effet de serre naturels. La vapeur d'eau H_2O est le principal gaz à effet de serre, mais les activités humaines n'ont que très peu d'impact sur les fluctuations de sa concentration. À côté du dioxyde de carbone CO_2 , on trouve parmi ces gaz à effet de serre également le méthane CH_4 , le protoxyde d'azote N_2O , ainsi que les gaz fluorés, seuls gaz créés par l'homme. Les différents gaz sont plus ou moins nocifs et mettent entre quelques mois à plusieurs milliers d'années à se décomposer. C'est pour cela qu'on utilise l'équivalent CO_2 comme unité de mesure pour comparer les émissions de différents gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement climatique (PRG).

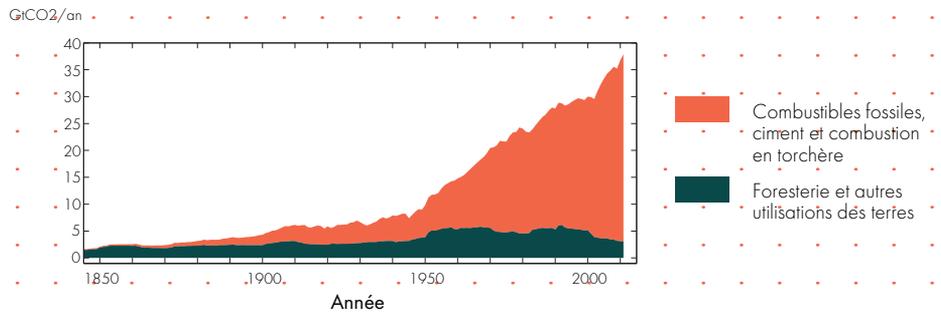
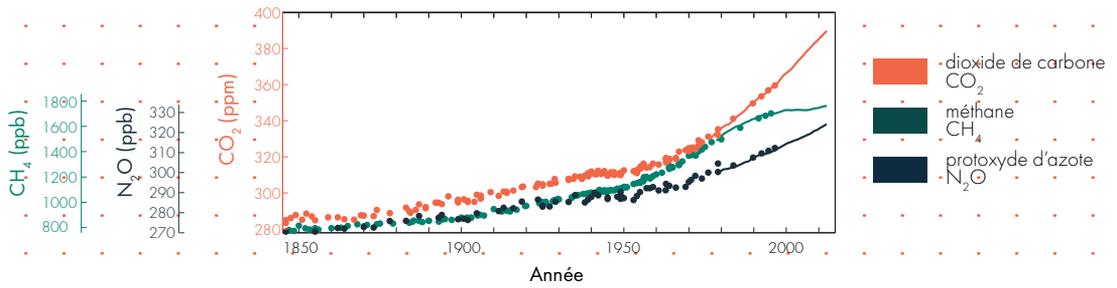
note:

Les pourcentages ne sont que donnés à titre indicatif. Les valeurs actuelles sont sujettes aux variations. Se référer à la source.

données :

Ministère de la transition écologique, « Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde », Paris, 2020.

L'effet de serre survient comme suit. L'énergie solaire non-réfléchi est absorbée par la surface terrestre qui se réchauffe. En contrepartie, ces surfaces émettent un rayonnement infrarouge. Les gaz à effet de serre sont pratiquement transparents au rayonnement solaire, mais opaques au rayonnement infrarouge. La chaleur y est piégée. Les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines modifient de plus en plus la composition de l'atmosphère et entraînent un réchauffement de la planète.



ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

CONTEXTE MONDIAL

fig. 3 : Moyenne mondiale des concentrations de gaz à effet de serre

mesures faites à partir de carottes de glace (points) et directement dans l'air (courbe)

« Les émissions de gaz à effet de serre générées par les activités humaines sont responsables des changements climatiques observés depuis le milieu du 20^e siècle. Les émissions mondiales ont commencé à augmenter fortement au début des années 1950 avec l'utilisation généralisée du pétrole en tant que combustible et carburant.^[1] »

fig. 4 : Émissions anthropiques mondiales de CO₂

Pourquoi parle-t-on autant des gaz à effet de serre? Probablement car leurs concentrations atmosphériques ont atteint des niveaux sans précédent depuis plus de 800'000 ans^[2]. On le sait au travers de l'analyse de carottes glaciaires. Une concentration élevée de CO₂ dans l'atmosphère corrélait toujours avec une température ambiante élevée, dû à l'effet de serre^[3].

Bien que les concentrations historiques aient été naturelles, celles d'aujourd'hui sont induites par l'homme. On parle alors de forçage anthropique^[4] pour désigner les perturbations dans l'équilibre énergétique de la Terre et qui engendrent des changements de température^[5].

C'est depuis l'époque préindustrielle et les émissions engendrées par l'activité humaine, donc anthropique, qu'a eu lieu la plus forte augmentation de concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'utilisation de combustibles et de carburants fossiles ainsi que les changements d'utilisation des sols sont les principaux facteurs, faisant passer la concentration de CO₂ du niveau préindustriel d'environ 280 ppm² en 1750 à plus de 415 ppm² en 2019^[6].

On distingue les émissions intérieures de gaz à effet de serre d'un pays

source :

adapté de GIEC, « Changement Climatique 2014 », GIEC, Genève, Suisse, rapport de synthèse, 2014.

[1] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020, p.12

[2] GIEC, « Changement Climatique 2014 », Genève, Suisse, rapport de synthèse, 2014, p.4

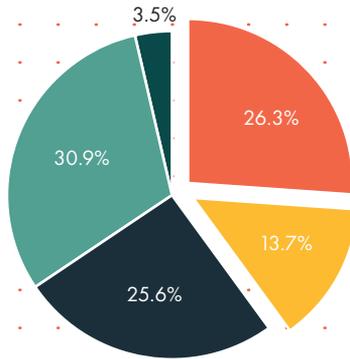
[3] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020, p.9

[4] càd. induit par l'Homme

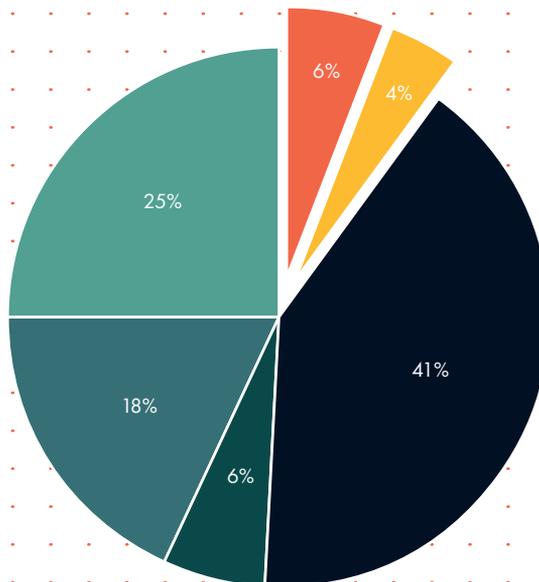
[5] Y. Fouquart, « Les différents types de forçage », Futura Planète, 2011, [En ligne]

[6] GIEC, « Changement Climatique 2014 », Genève, Suisse, rapport de synthèse, 2014, p.4

2019



2018



2018

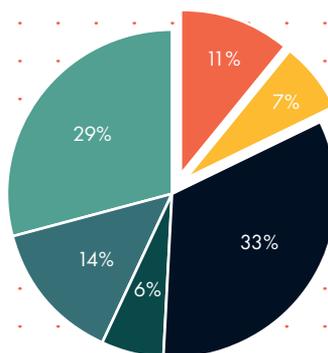


fig. 5 : répartition de la consommation finale d'énergie par secteur dans l'UE

données :

« Energy statistics - an overview », eurostat [en ligne], 2021, [consulté le janv. 09 2022].

aux émissions extérieures. Les émissions intérieures correspondent aux émissions générées dans le pays même, alors que les émissions extérieures regroupent toutes les émissions générées dans d'autres pays pour le pays concerné, par exemple au travers de l'importation de marchandises. Nous ne rentrerons pas dans le détail de comparaisons entre pays, mais il est important de faire la part des choses. Ce n'est pas parce qu'un pays n'émet que peu de gaz à effet de serre sur ses terres que c'est un pays exemplaire. Il faut prendre en compte son impact à l'étranger, si non, la Suisse serait un exemple pour de nombreux pays occidentaux : 4.4 t CO₂/hab./an d'émissions intérieures, 11.3 t CO₂/hab./an d'émissions globales^[7]. En 2015, le seuil découlant des limites planétaires, était fixé à 0.6 t CO₂/hab./an^[8], pour n'avoir besoin que d'une seule planète.

Intéressons nous maintenant plutôt à la répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre.

On constate qu'en 2018, la production d'électricité reste le premier secteur d'émission de CO₂ dans le monde, responsable pour 41% du total des émissions due à la combustion d'énergie. Viennent ensuite le secteur des transports avec 25% et le secteur de l'industrie avec 18%, comprenant la construction. A l'échelle mondiale, les secteurs du ménage et des services ne représentent que 10% de l'impact total. À l'échelle de l'Union Européenne, ceux-ci représentent une part bien plus importante, de l'ordre de 18%^[9], probablement à cause du climat et du confort de vie présent. Ce sont ces deux derniers secteurs qui concernent l'architecte, puisque c'est lui qui conçoit le cadre bâti pour leurs activités et peut donc influencer leur consommation au travers de leur conception.

fig. 6 : émission de gaz à effet de serre par secteur dans le monde

fig. 7 : émission de gaz à effet de serre par secteur dans l'UE

données :

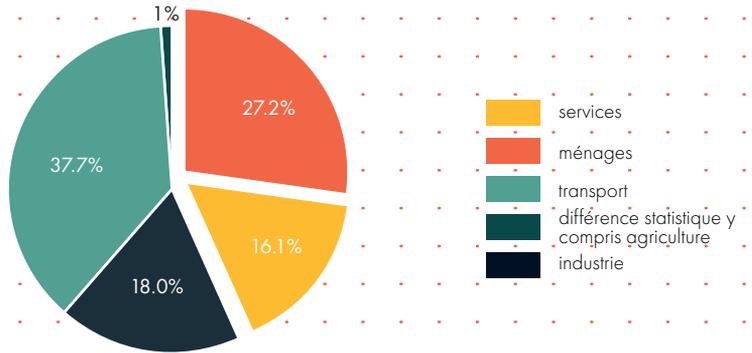
Ministère de la transition écologique, « Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde », 2020

[7] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020, p.27, p.29

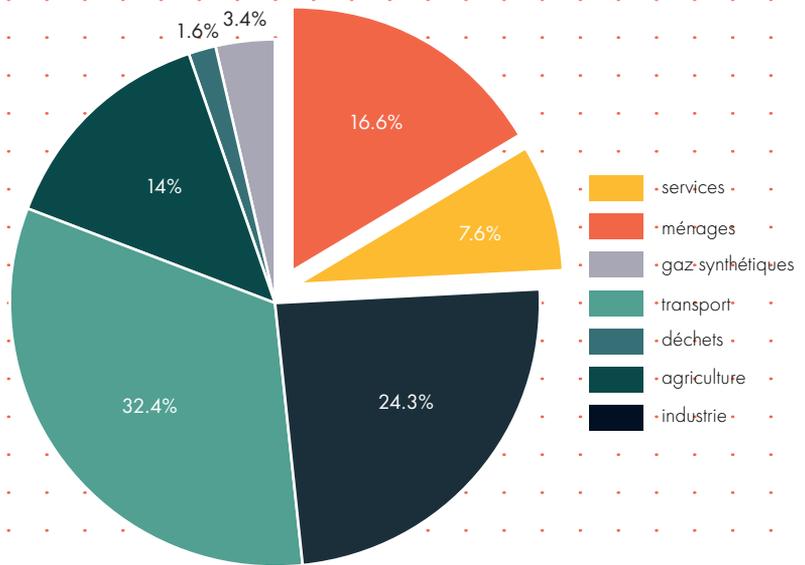
[8] OFEV, « Climat: en bref », 2021, [En ligne]

[9] Ministère de la transition écologique, « Chiffres clés du climat », 2020, p.38

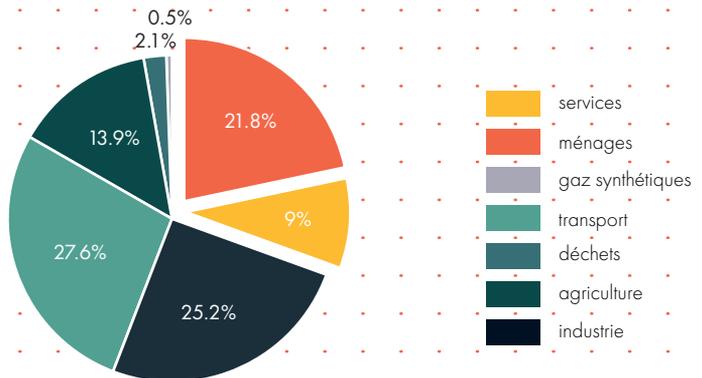
2019



2019



1990



ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

fig. 8: répartition de la consommation finale d'énergie selon les groupes de consommateurs en Suisse

données :
OFEN, « Statistique globale Suisse de l'énergie 2019 », Berne, 2019

CONTEXTE SUISSE

« Entre 1900 et 2018, les émissions totales de gaz à effet de serre de la Suisse ont été pratiquement multipliées par quatre, passant d'environ 12 à 46,4 millions de tonnes d'équivalents CO₂ (éq.-CO₂)^[10] »

fig. 9 : émission de gaz à effet de serre par secteur en Suisse

« Depuis 1990, les émissions de gaz à effet de serre sur le territoire suisse ont reculé de -14% », nous informe l'Office Fédéral de l'environnement. Réjouissant certes, quand on sait que cela représente un rejet de seulement 46.2 mio t eqCO₂ pour l'année 2019, soit 5.5 t d'eqCO₂ par habitant. Mais à cela doit être ajouté les émissions générées à l'étranger, ce qui fait plus que doubler les émissions annuelles par habitant (14 t eqCO₂/hab.).

En Suisse, la majeure partie des émissions intérieures totales de gaz à effet de serre provient du secteur des transports (hors transport aérien et maritime), à hauteur de 32.4% en 2018, contre 27.6% en 1990 (+4.9%). Vient ensuite le secteur de l'industrie avec 24.1% et de l'agriculture avec 14.2%. Le secteur du bâtiment génère quant à lui 24.2% des émissions, dont 16.6% est imputable aux ménages et 7.6% aux services. Par rapport à 1990, ceci correspond à 4.09 mio t eqCO₂^[11] rejetés en moins par an. Enfin, les émissions provenant des gaz synthétiques (3.7%) et de l'incinération des déchets (1.4%) ne contribuent que faiblement à la part totale des émissions.

fig. 10 : émission de gaz à effet de serre par secteur en Suisse

données :
OFEV, indicateurs d'évolution des émissions de GES de 1990-2019, 2020

[10] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020, p.13

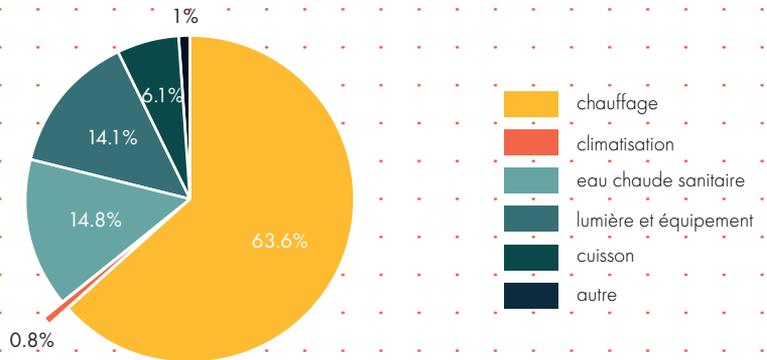
[11] OFEV, « Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse 1990-2019 », Berne, 2021

En savoir plus :

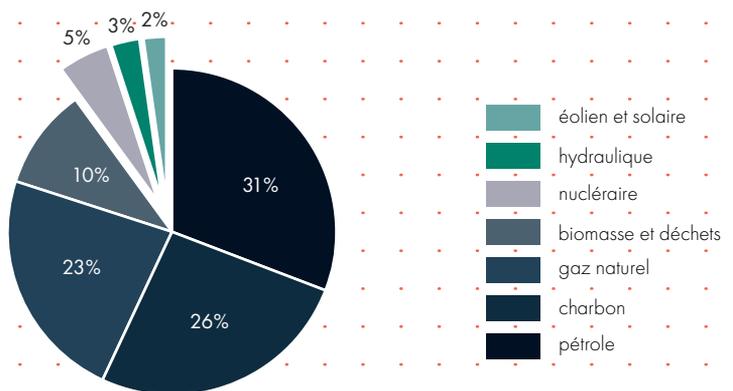
En trente ans, le nombre de climatiseurs a triplé sur la planète représentant en 2016, 10% de l'électricité mondiale consommée (avec les ventilateurs).

source : P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020.

2019



2018



ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

LE SECTEUR DU BÂTIMENT

« Les émissions liées au fonctionnement d'un bâtiment sont deux fois supérieures à celles relatives à sa construction. Agir sur l'énergie consommée lors du fonctionnement du bâtiment a donc deux fois plus d'effet sur la diminution de ces émissions que d'agir sur les matériaux de construction et de chantier.^[12] »

fig. 11 : sources d'énergie consommée par les ménages dans l'UE

données : « Energy consumption in households », eurostat [en ligne], juin 2021, [consulté le janv. 09 2022].

Philippe Rahm nous permet de faire le lien entre tout ces constats scientifiques et l'implication de l'architecte dans celui-ci.

Il nous explique dans « L'Histoire naturelle de l'architecture » que 90% de l'énergie consommée dans le monde est issue de sources carbonées. La combustion de ces énergies sont les principaux émetteurs de CO₂. Seul 10% proviennent de sources propres, comme le nucléaire, le solaire, l'éolien, l'hydraulique ou la géothermie ; «[...] toutefois, ces énergies ont d'autres impacts sur l'environnement, qui doivent être pris en compte.^[13]» Afin de réduire nos émissions de CO₂, il faut donner une part dominante aux énergies renouvelables et autres sources qui n'induisent pas de réchauffement climatique. C'est ce qu'on appelle la transition énergétique.

fig. 12 : sources d'énergie consommée dans le monde

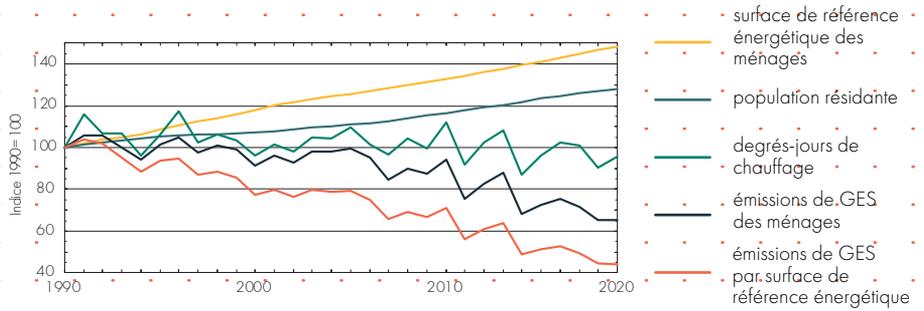
Nous avons vu que la consommation d'énergie dans l'Union Européenne concerne principalement l'industrie (25.6%), les transports (30.9%), les ménages (26.3%) et les services (13.7%)(cf. fig. 5). En Suisse les transports représentent 37.7%, les ménages 27.2%, l'industrie 18.0% et les services 16.1% (cf. fig. 8). Dans chacun des secteurs, une partie est de la consommation énergétique provient directement des modalités de construction et/ou des besoins en chauffage ou climatisation.

« Le secteur de la construction représente 8% de l'énergie consommée : 2%

données : P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020

[12] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.272

[13] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.271



pour produire le ciment et le verre, 10% pour les métaux et 11% pour les activités minières^[14] » nous indique Philippe Rahm. Certes, c'est une part importante, mais elle l'est bien moins comparée aux 18% d'énergie consommée par les ménages et les services afin de chauffer, ventiler et refroidir l'air intérieur de nos bâtiments.

La principale source de consommation d'énergie dans les habitations européennes est le chauffage, à hauteur de 63.6%. Viennent ensuite l'eau chaude sanitaire avec 14.8%, la lumière et les équipements avec 14.1% et la cuisson avec 6.1%. Moins de 1% est aujourd'hui consacré à la climatisation dans les logements.

fig. 13 : évolution des émissions de GES des ménages par rapport à 1990

En Suisse, le secteur du bâtiment se compose du secteur des ménages (*residential*) et des services^[15] (*commercial/institutional*).

En 2019, les ménages généraient 16.6% des émissions totales de CO₂ sur sol Suisse. Ces émissions sont principalement la conséquence de la combustion d'énergies fossiles (gaz naturel et mazout) à des fins de chauffage des bâtiments et de préparation d'eau chaude sanitaire.

On notera que malgré une hausse de la population, la consommation d'énergie est en baisse. Cela est due à deux facteurs principaux. En premier, l'amélioration énergétique des bâtiments, que ce soit au niveau de leur enveloppe thermique ou de leur mode de chauffage. Et deuxièmement, les besoins en chauffage sont fortement corrélés aux conditions météorologiques. Les hivers devenant de plus en plus chauds, les besoins en chauffage diminuent en conséquence (émissions de GES par surface de référence énergétique: -56% de 1990 à 2019)^[16].

Les services généraient en Suisse 7.6% des émissions totales de gaz à effet de serre en 2019. Ici aussi, la principale raison de ces émissions provient des besoins en chauffage des bâtiments. Les améliorations énergétiques faites sur les bâtiments de ce secteur ont permis une réduction de -46.2% des émissions de GES par surface de référence énergétique en 1990 et 2019.

fig. 14 : évolution des émissions de GES des services par rapport à 1990

Nos bâtiments consomment de l'énergie^[17], et pas qu'un peu. En tout 8.61 gigatonnes de CO₂ pour l'année 2017. Le constat est là : Les bâtiments que nous occupons et concevons en tant qu'architectes utilisent de l'énergie qui, en rejetant du CO₂, est responsable du changement climatique. Une petite valeur cependant devrait attirer votre attention : les 0.8% d'énergie consommée dans l'Union Européenne à des fins de climatisation. Vous allez voir par la suite, pourquoi cette valeur est susceptible d'évoluer.

source :

© OFEV, « Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse 1990–2019 », Berne, 2021. (modifié)

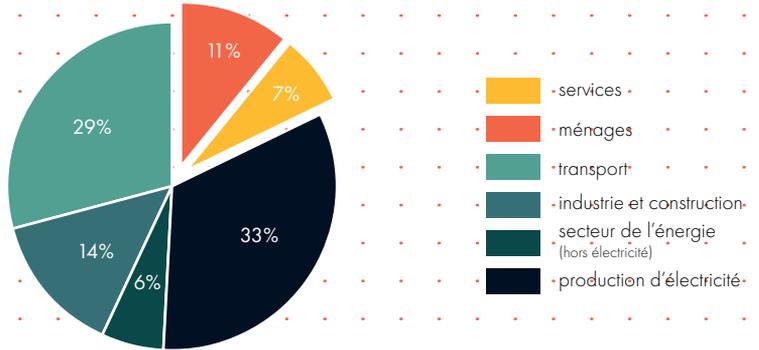
[14] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.272.

[15] secteurs délimités selon la nomenclature attachée à l'Ordonnance sur le CO₂

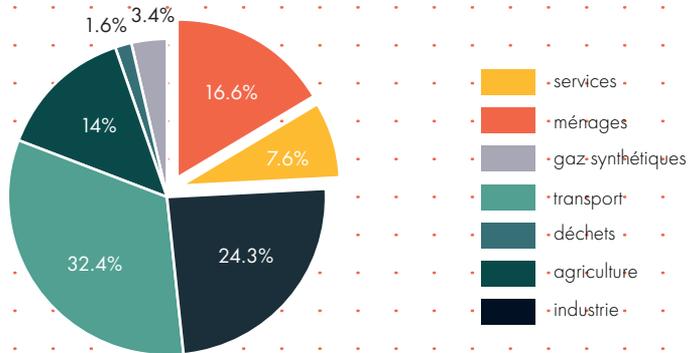
[16] voir OFEV, « Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse 1990–2019 », Berne, 2021.

[17] ne pas confondre consommation d'énergie (qui peut être propre) et rejet de CO₂

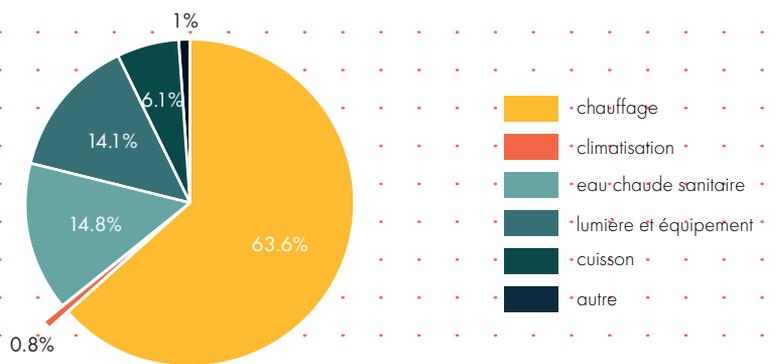
2018



2019



2020



SYNTHÈSE

fig. 7 : émission de gaz à effet de serre par secteur dans l'UE en 2018

données :
Ministère de la transition écologique, « Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde », 2020

fig. 9 : émission de gaz à effet de serre par secteur en Suisse en 2019

données :
OFEV, indicateurs d'évolution des émissions de GES de 1990-2019, 2020

fig. 11 : sources d'énergie consommée par les ménages dans l'UE en 2020

données : « Energy consumption in households », eurostat [en ligne], juin 2021, [consulté le janv.09 2022].

QUAND LES CLIMATISEURS NOUS RÉCHAUFFENT

Les gaz à effet de serre sont des gaz naturellement présents dans l'atmosphère, mais l'activité humaine en perturbe son équilibre. En trop grande concentration, ces gaz conservent trop de chaleur et empêchent son renvoi dans l'espace, et la redirigent vers la terre, réchauffant ainsi sa surface.

En soit, toute activité humaine de notre société actuelle est source d'émission de CO₂. Que ce soit les transports, l'industrie, l'agriculture, les services ou les ménages, tous les secteurs sont touchés, mais pas à part égale. Le secteur du bâtiment dans lequel on peut comprendre les services et les ménages, représentent à l'échelle mondiale seulement 10% des émissions de gaz à effet de serre en 2018. Mais dans les pays occidentaux, la part de ces émissions est bien plus importante. Dans l'Union Européenne les bâtiments sont responsables de 18% des émissions totales et en Suisse de 24.2% en 2019. Malgré les réjouissances de l'OFEV sur les réductions d'émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs du logement et des services ces dernières années, ils sont la source d'un quart d'un problème qui touche toute l'humanité : le changement climatique.

Le secteur de la construction représente 8% de l'énergie consommée dans le monde. Cela représente certes une part importante, mais elle l'est bien moins comparée aux 18% d'énergie consommée par les ménages et les services afin de chauffer, ventiler et refroidir l'air intérieur de nos bâtiments. La principale source de consommation d'énergie dans les habitations européennes est le chauffage, à hauteur de 63.6%. Viennent ensuite l'eau chaude sanitaire avec 14.8%, la lumière et les équipements avec 14.1% et la cuisson avec 6.1%. Moins de 1% est aujourd'hui consacrée à la climatisation dans les logements. Mais à l'échelle mondiale, le nombre de climatiseurs a triplé sur la planète, représentant en 2016 pas moins de 10% de l'électricité mondiale consommée (avec les ventilateurs).

Les émissions liées au fonctionnement d'un bâtiment sont deux fois supérieures à celles de sa construction. Agir sur l'énergie consommée lors du fonctionnement du bâtiment a donc deux fois plus d'effet sur la diminution des émissions de CO₂ que d'agir sur les matériaux de construction. Et vous allez voir par la suite, pourquoi trouver un remplacement à la climatisation sera nécessaire et ce, même sous nos latitudes.

OBSERVATIONS ACTUELLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

augmentation des concentrations de gaz à effet de serre
+148% CO₂
+260% CH₄
+123% N₂O
depuis 1850

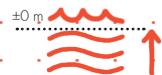


responsabilité de l'homme pour le changement climatique assurée depuis 2020

vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses
depuis 1950



périodes de sécheresse plus intenses et plus fréquentes
depuis 1950



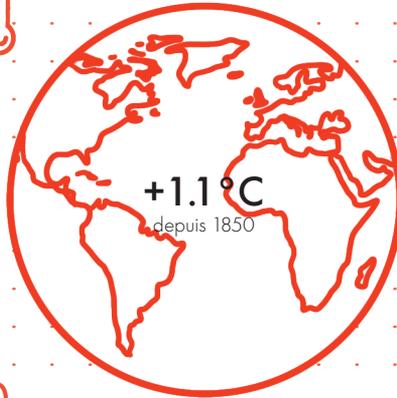
élévation du niveau de la mer de 0.2m depuis 1901

vagues de froid moins fréquentes et moins intenses
depuis 1950



réchauffement global des océans +0.8°C depuis 1970

vagues de chaleur maritimes +100% depuis 1980



fortes précipitations plus intenses et plus fréquentes
depuis 1950



acidification des océans anormale par rapport au cours des 2 dernières millions d'années

cyclones plus nombreux
depuis 1950



réduction du volume des glaciers et calottes glaciaires
depuis 1850

OBSERVATIONS ACTUELLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

CONTEXTE MONDIAL

« L'ampleur des changements récents observée sur le système climatique est sans précédent depuis des siècles voire, parfois, des millénaires. »

« Les augmentations observées des concentrations de gaz à effet de serre depuis environ 1750 sont, sans équivoque, causées par les activités humaines ^[1]»

fig. 15 : modification
du climat observés
dans le monde en
2020

En été 2021 paraissait la première partie du 6^{ème} rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat (GIEC). Celui-ci analyse les bases scientifiques du changement climatique depuis 1988.

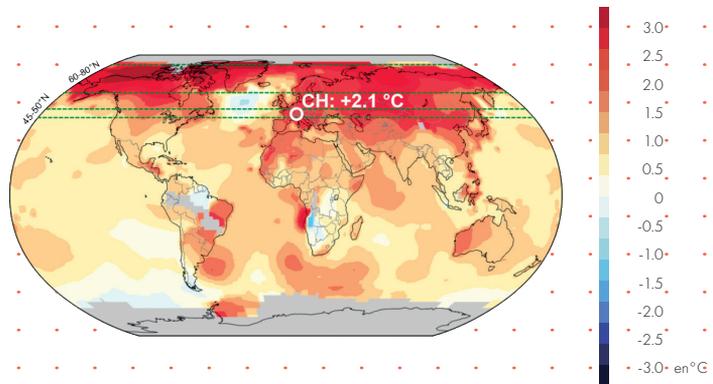
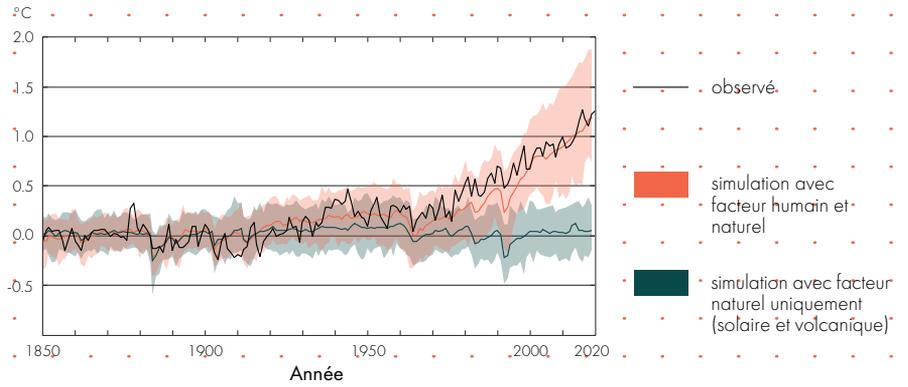
Ce dernier rapport confirme pour l'essentiel les conclusions des rapports précédents, avec pour constat majeur : la responsabilité de l'humain concernant le changement climatique n'est plus discutable. Les émissions anthropiques^[2] de gaz à effet de serre ont réchauffé le climat de la Terre et sont en partie responsables des récents phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes. Comme l'explique un article de *MétéoSuisse*, les émissions de gaz à effet de serre n'ont cessé d'augmenter ces dernières années. La concentration en CO₂ dans l'atmosphère est aujourd'hui la plus élevée depuis au moins 2 millions d'années.^[3] Ceci explique la forte augmentation des températures depuis 1850. L'activité humaine crée une décorrélation avec les changements climatiques qui surviennent de manière naturelle (cf. figure 16). Là où les éruptions volcaniques et les changements d'orbite de la Terre ont une contribution minime au changement climatique, l'Homme peut fièrement brandir sa responsabilité concernant les +1.1 °C de réchauffement depuis la période 1850-1900. Pourquoi un changement de

données : WMO, « The State of the Global Climate 2020 », Genève, 2021, [En ligne]

[1] GIEC, summary for policymakers 2021

[2] càd. induit par l'Homme

[3] meteosuisse



température aussi minime créé-t-il autant d'ébat? Car ce n'est pas la température d'une seule journée dans l'année qui change, mais bien un climat auquel se sont adaptés une multitude d'écosystèmes sur des milliers, voire des millions d'années.

« Si elles se poursuivent, les émissions de gaz à effet de serre provoqueront un réchauffement supplémentaire et une modification durable de toutes les composantes du système climatique, ce qui augmentera la probabilité de conséquences graves, généralisées et irréversibles pour les populations et les écosystèmes.^[4] »

fig. 16 : modification de la température de surface globale (moyenne annuelle)

source : © GIEC, « Changement Climatique 2021 », GIEC, Genève, Suisse, summary for policy makers 6, août 2021.

Ainsi, les éléments à retenir sont :

- l'homme est responsable du changement climatique
- le changement climatique touche désormais toutes les régions du monde
- la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur et fortes précipitations continuent d'augmenter, ainsi que de l'occurrence de période sèches dans certaines régions du monde
- la température moyenne mondiale a augmenté de +1.1°C depuis la période pré-industrielle (le réchauffement sur les terres (+1.6°C) étant plus important que sur les océans (+0.9°C))
- le système climatique global (atmosphère, océan, banquises et glaciers) évolue à un rythme sans précédent depuis plusieurs siècles à millénaires^[5]

fig. 17 : modification de la température de surface globale (moyenne annuelle)

commentaire :
Réchauffement mesuré sur la Terre selon le jeu de données GISTEMP v4 de la NASA. La différence entre les moyennes sur 30 ans 1881-1910 et 1991-2020 est indiquée [en °C]. [...] Le réchauffement de +2,1 °C sur la Suisse pendant la période indiquée se compare bien au résultat de la température moyenne suisse (+2,0 °C).
(© NCCS)

source : © NCCS, « Changement climatique mondial », [en ligne], 2018. [Consulté le: 2 jan. 2022].

[4] GIEC, « Changement Climatique 2014 », GIEC, Genève, Suisse, rapport de synthèse, 2014, p.8

[5] NCCS, « Le nouveau rapport du GIEC : principales déclarations et regard sur la Suisse », 2021, [En ligne].

ensoleillement
-15% 1950-1980
+20% depuis 1980



vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses
depuis 1901

fortes précipitations
12% plus intenses
30% plus fréquentes
depuis 1961



précipitations hivernales
+20% à 30%
depuis 1864

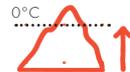
jours de neige
-50% au-dessous de 800m
-20% au-dessous de 2000m
depuis 1961



+2°C
depuis 1864



jusqu'à -60 jours de gel
depuis 1961



isotherme du 0 degré
+300 à 400m
depuis 1961

période de végétation
+2 à +4 semaines
depuis 1961



volume des glaciers -60%
depuis 1850

OBSERVATIONS ACTUELLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

CONTEXTE SUISSE

En Suisse, on observe une augmentation de la température de +2 °C depuis le début des mesures en 1864^[6]. Ceci équivaut au double de l'augmentation mondiale de température.

fig. 18 : modification
du climat observés en
Suisse en 2019

Bien que le climat suisse fasse preuve d'importantes fluctuations naturelles, les changements visibles depuis le début du 20^{ème} siècle ne peuvent s'expliquer qu'au travers d'une activité humaine polluuse. Les effets du changements climatiques se reflètent au travers de plusieurs paramètres, mais c'est l'évolution de la température qui en est le plus marquant.

La tendance croissante de la température moyenne en Suisse avoisine les +0.14 °C par décennie^[7], soit à peu près le double de la tendance mondiale moyenne^[8]. Cette tendance est de +0.39 °C en considérant uniquement les mesures à partir de 1961, année où une forte accélération à l'échelle de la planète est perceptible.

Sans surprise, la principale cause de cette progression globale et régionale sont les rejets de gaz à effet de serre anthropiques. La hausse plus marquée des températures en Suisse par rapport à la moyenne mondiale a trois causes : premièrement les terres émergées se réchauffent bien plus que les océans, qui agissent comme un stockage thermique jusque dans les profondeurs maritimes. Deuxièmement, sa proximité avec les régions polaires qui se réchauffent davantage due en partie à la fonte de la calotte glaciaire. Et enfin, des effet régionaux, tel que la diminution du manteau neigeux alpin, contribuant à une plus grand accumulation de chaleur^{[9][10]}.

sources : adapté de NCCS,
« CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018

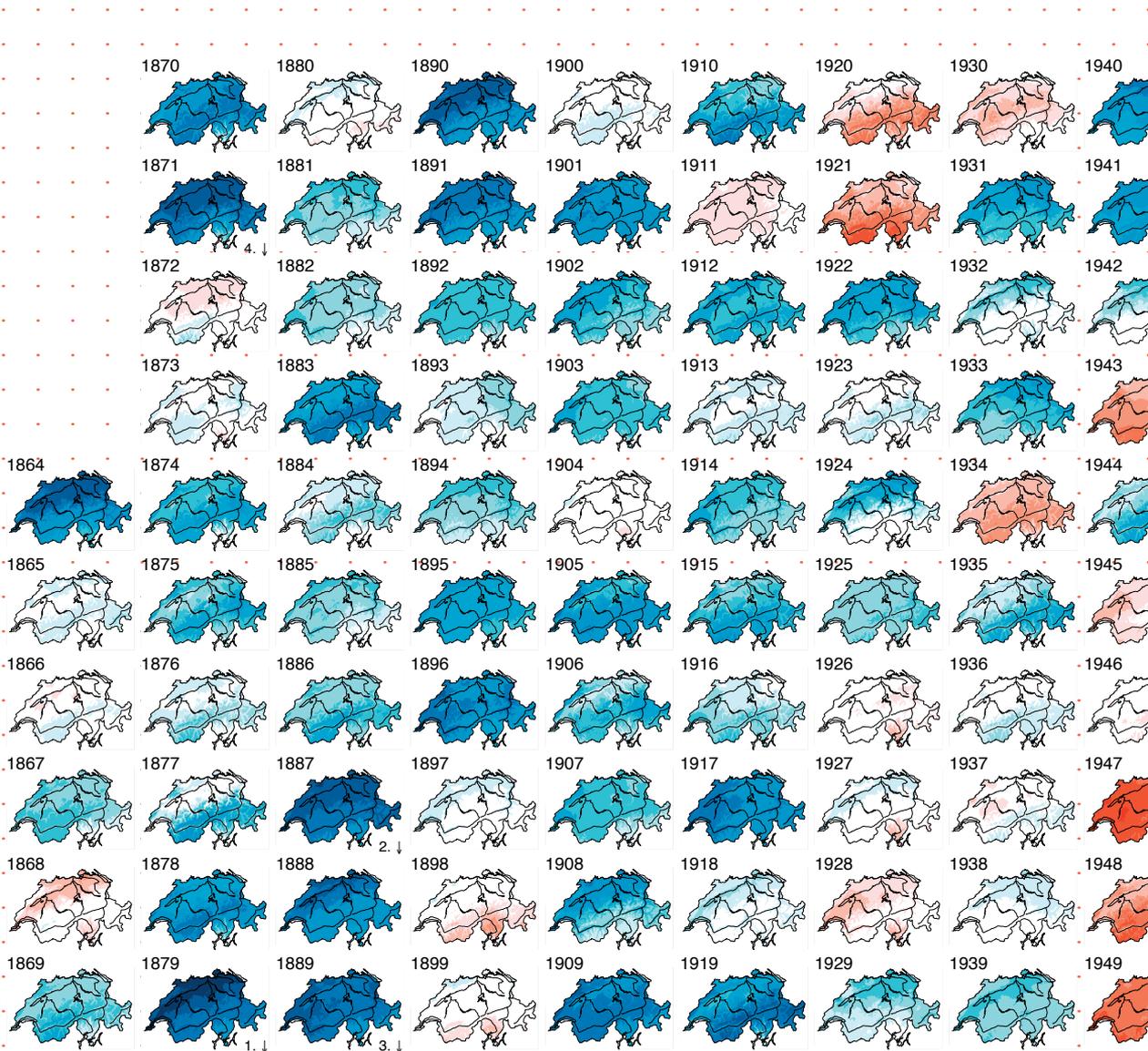
[6] MétéoSuisse, « Changement climatique Suisse », 2021

[7] sur une période allant de 1864 à aujourd'hui

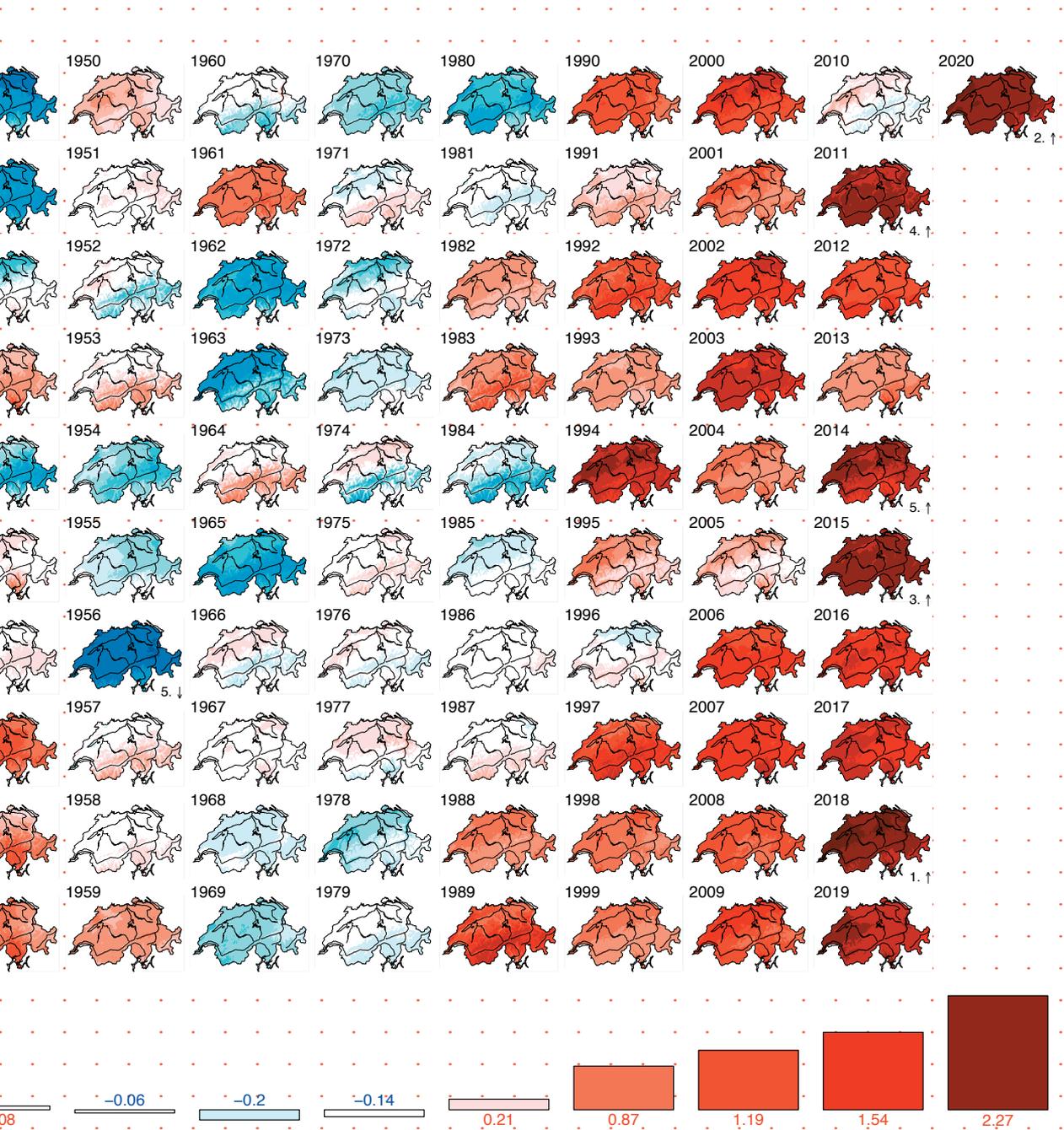
[8] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », 2020

[9] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », 2020, p.32

[10] Conseil d'État, « Plan climat vaudois », 2020, p.10



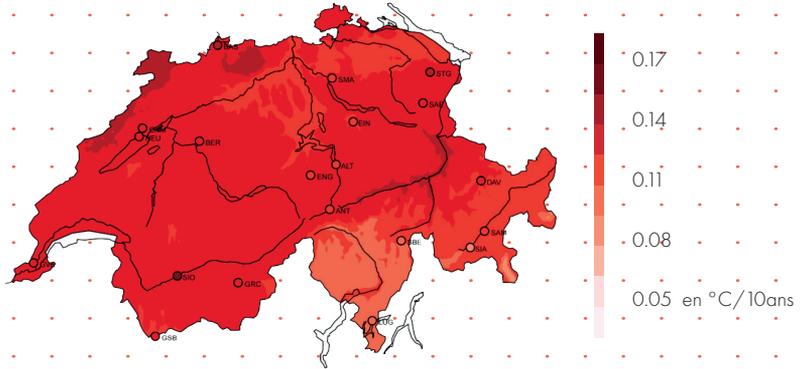
période de référence : moyenne des années 1961 à 1990



© MeteoSchweiz / © MétéoSuisse / © MeteoSvizzera / © MeteoSwiss

clim.stamps (clim.vis; v0.3.28) / 02.01.2021, 15:45 CET

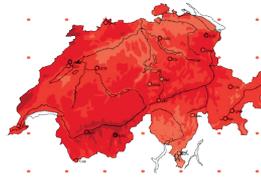
fig. 19 : changement de la température annuelle moyenne depuis 1864



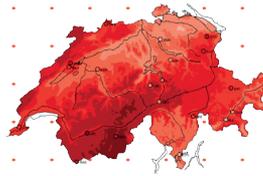
hiver



printemps



été



automne



Ainsi, cela fait plus de 30 ans qu'aucune année en Suisse n'a été plus froide que la moyenne des années 1961 à 1990 (cf. fig. 19). Ce sont principalement les mois d'été et de printemps qui tirent les moyennes vers le haut avec une hausse respective de 0.54°C et 0.46°C par décennie, tandis que les mois d'hiver et d'automne sont bien plus faibles avec 0.31°C et 0.26°C par décennie.

La hausse des températures moyennes accompagne également une forte augmentation du nombre de journées tropicales^[11], tandis que les jours sans dégel^[12] et de gel^[13] ont fortement diminué. La hausse entraîne également une élévation de l'isotherme du zéro degré de l'ordre de 150m à 200m/°C, ainsi qu'un développement précoce de la végétation au printemps par rapport aux décennies précédentes.^[14]

fig. 20 : changement de la température annuelle moyenne depuis 1864

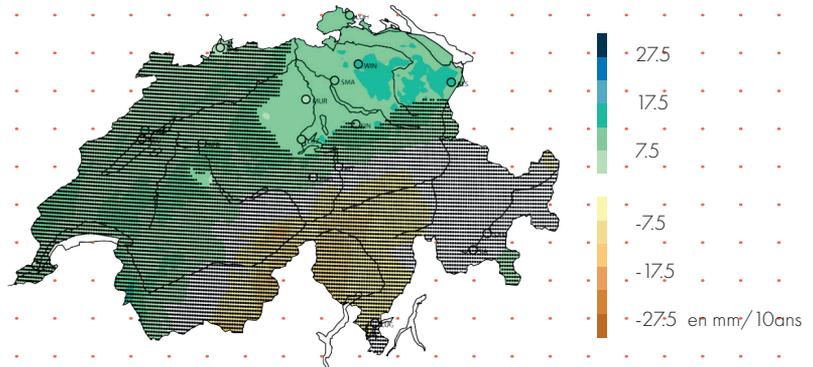
fig. 21 : Changement de la température saisonnière moyenne depuis 1864

[11] c.à.d. une journée avec une température maximale supérieure ou égale à 30°C

[12] c.à.d. une journée avec une température maximale inférieure à 0°C

[13] c.à.d. une journée avec une température minimale inférieure à 0°C

[14] MétéoSuisse, « Changement climatique Suisse », 2021



Le changement climatique modifie également le régime des précipitations. Bien que les précipitations estivales moyennes n'aient pas vraiment évolué, ce sont les précipitations hivernales qui ont augmentées dans la plupart des régions du plateau. Le changement le plus important concerne les épisodes extrêmes (intensité et fréquence des fortes précipitations) qui se sont renforcés depuis 1901. Ces fortes précipitations renforce le ruissellement de surface dans les bassins versants, pouvant créer des inondations, glissements de terrains ou boues torrentielles entraînant des dommages matériels. Malgré l'augmentation des précipitation hivernales et comme conséquence de l'augmentation des températures, on constate moins de jours de chute de neige et moins de neige fraîche qu'il y a 30 - 40 ans^[15], réduisant la couverture neigeuse des Alpes.

fig. 22 : changement des précipitations annuelles moyennes depuis 1864

Tous ces indicateurs mènent au même constat : le climat si fragile de la Suisse est perturbé, et ce par la main de l'Homme. C'est lui qui en subira directement les conséquences.

fig. 23 : évolution de la fréquence et de l'intensité des fortes précipitations

commentaire : modification de la fréquence (à gauche) et de l'intensité (à droite) des fortes précipitations entre 1901 et 2015 aux stations suisses de mesure des précipitations (modification en % par siècle).

En vert : augmentation

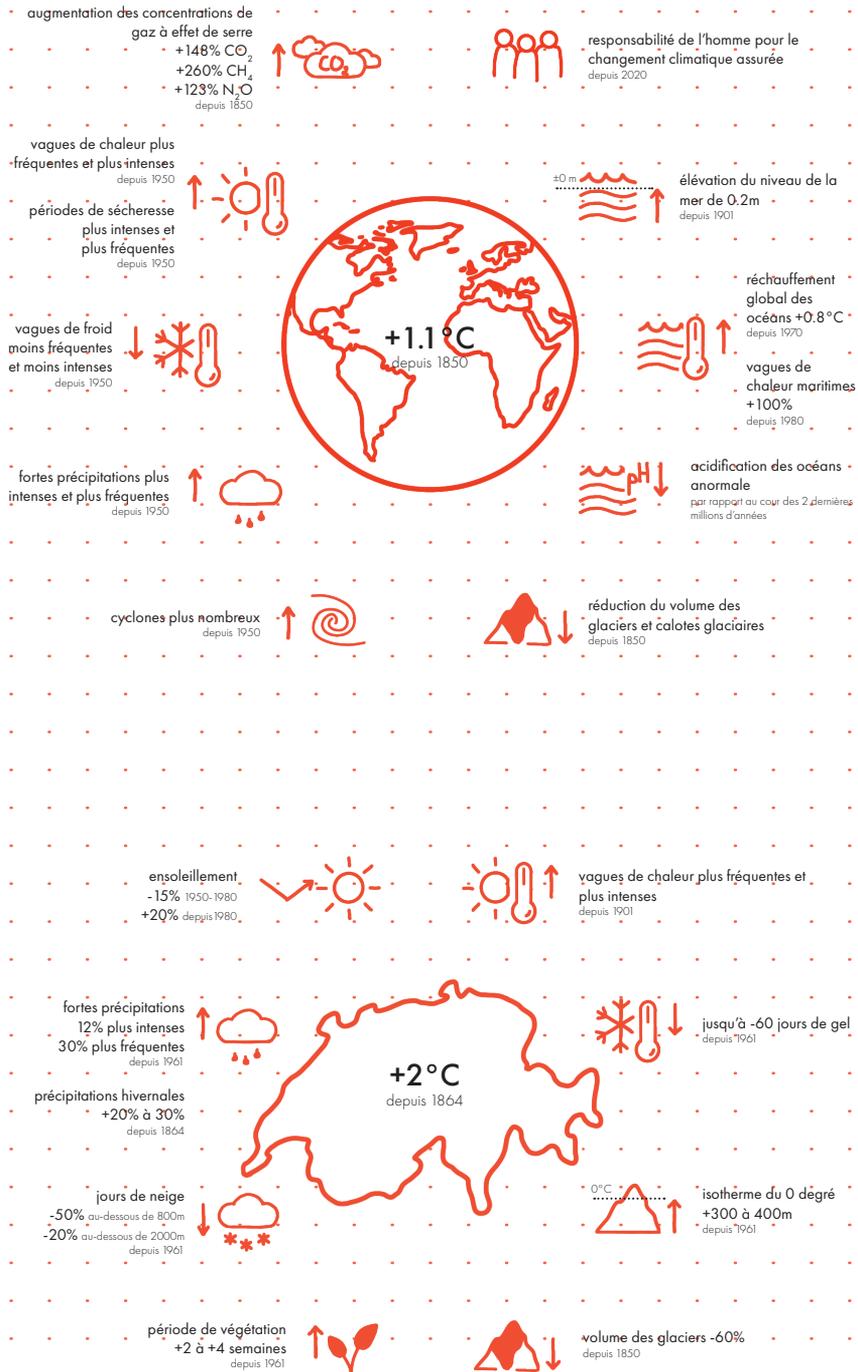
En orange : diminution

Des changements significatifs (cercles pleins) sont observés dans plus de 30 % des stations.

(texte original ©OFEV)

© MétéoSuisse, « Évolution de la température et des précipitations », 2020, [En ligne]
© OFEV, « Changements climatiques en Suisse », 2020, source originale Scherrer et al., 2016

[15] MétéoSuisse, « Evolution de la température et des précipitations », 2020, [en ligne]



SYNTHÈSE

QUAND L'HOMME CHAMBOULE TOUT : OBSERVATIONS ACTUELLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

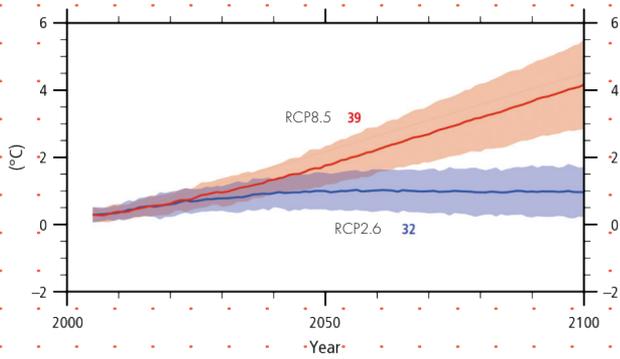
Les constats fait par le GIEC et autres scientifiques sont sans appel : l'homme est responsable du changement climatique. Lui seul est responsable du réchauffement de la planète et autres dérèglements climatiques qui touchent maintenant toutes les régions du monde.

On constate aujourd'hui que la température moyenne mondiale a augmenté de +1.1°C depuis la période pré-industrielle, soit +1.6°C sur les terres et +0.9°C sur les océans. La fréquence et l'intensité des vagues de chaleur et fortes précipitations continuent également d'augmenter, tout comme l'occurrence de période sèches dans certaines régions du monde.

Pourquoi un changement de température aussi minime créé-t-il autant d'ébats? Car ce n'est pas la température d'une seule journée dans l'année qui change, mais bien un climat auquel se sont adaptés une multitude d'écosystèmes sur des milliers, voire des millions d'années. Un changement du système climatique global (atmosphère, océan, banquises et glaciers) évoluant à un tel rythme bouleverse tout l'équilibre planétaire.

La Suisse aussi est touchée par le changement climatique. Avec une augmentation actuelle de +2°C, elle se réchauffe près de deux fois plus vite que le restant de la planète. Son caractère alpin en fait un pays particulièrement sensible au changement climatique. Les cinq années les plus chaudes de la série de mesure dont on dispose (1864 à 2019) ont toutes été enregistrées après 2010. Mais ce n'est pas seulement l'augmentation de la température observée qui inquiètent. Ce sont tous les paramètres qui constituent le climat suisse qui changent. Les plus marquant d'entre eux sont l'augmentation des événements extrêmes, notamment les périodes de canicule plus longues et plus chaudes et les fortes précipitations plus intenses et plus fréquentes. L'augmentation des températures entraîne également la réduction de la couverture neigeuse des Alpes, et nous allons voir par la suite que ce blanc emblématique du paysage suisse, est voué à sa disparition.

OBSERVATIONS FUTURES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE



OBSERVATIONS FUTURES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

CONTEXTE MONDIAL

«Le changement climatique touche déjà toutes les régions de la Terre de multiples façons. Les changements observés augmenteront avec tout réchauffement supplémentaire^[1]»

fig. 24 : évolution prévue de la température moyenne mondiale jusqu'à la du 21ème siècle (par rapport à 1986-2005)

Les modèles informatiques utilisés pour comprendre le développement climatique observé peuvent également servir à formuler des hypothèses climatiques futures, selon l'évolution future des gaz à effet de serre. Les simulations provenant de ces modèles montrent l'influence des émissions de gaz à effet de serre sur divers variables, telles que la température moyenne globale, les régimes de précipitations ou le niveau global de la mer. Plusieurs modèles différents utilisant un même scénario d'émission (appelé *Representative Concentration Pathways RCP*) permettent de décrire le degré d'incertitude d'un scénario climatique.

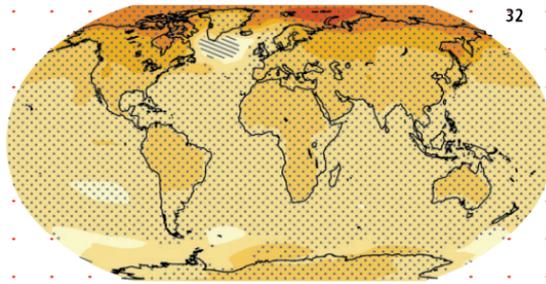
Les deux scénarios extrêmes retenus sont le RCP8.5 et le RCP2.6. Le premier scénario RCP8.5 prend le rôle de pire scénario envisageable. Il considère un avenir sans mesure de protection du climat : aucune mesure d'atténuation n'est prise malgré les progrès scientifiques et technologiques. Le scénario opposé, le RCP2.6, est perçu comme le meilleur scénario envisageable, car il comprend un avenir avec des mesures significatives de protection du climat : les objectifs de l'Accord de Paris 2015 sont respectés et le réchauffement mondial est limité à +2°C par rapport à l'ère préindustrielle.

La figure 24 indique l'élévation de la température globale (température de surface terrestre et maritime) jusqu'en 2100. On constate que les différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre projetés ont une forte influence sur le climat futur. Les hypothèses du scénario pessimiste RCP8.5 mènerait à un augmentation moyenne de la température de +4°C. Le scénario optimiste RCP2.6 quant à lui limite la hausse des température à +1°C

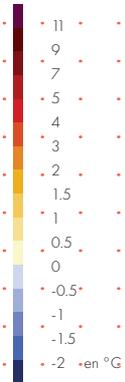
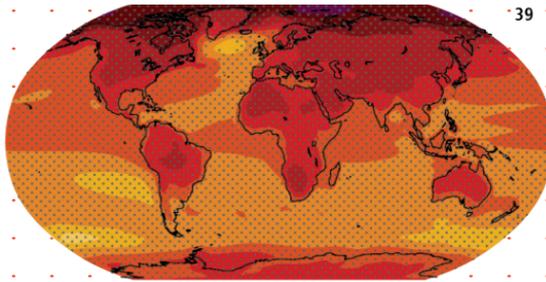
source :
MétéoSuisse, « Changement climatique mondial », 2018, [En ligne]; de © IPCC AR5 (modifié)

[1] déclaration de Panmao Zhai, co-président du Groupe de travail I du GIEC

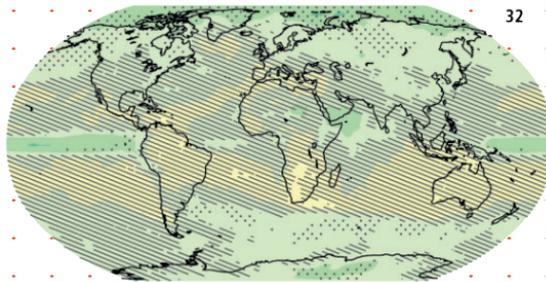
RCP2.6



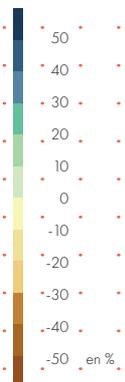
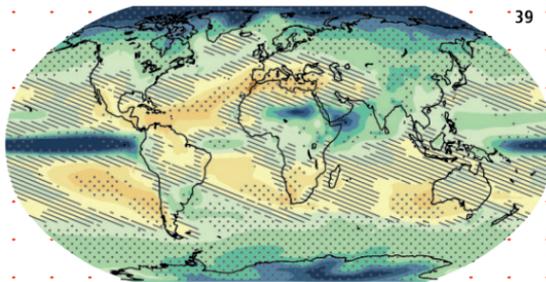
RCP8.5



RCP2.6



RCP8.5



Les zones pointillées sont des régions avec forte unanimité des modèles individuels, les zones hachurées sont des régions avec une faible unanimité.

par rapport aux conditions actuelles, soit un réchauffement total depuis l'ère préindustrielle de +2°C.

« Comme pour les tendances dans le passé, le changement climatique dans le futur variera également régionalement. Cela signifie que l'augmentation moyenne de la température décrite ci-dessus ne s'applique pas de manière uniforme à toutes les régions de la Terre»^[2].

En effet, la figure 25 indique la distribution spatiale des changements de température et de régime de précipitation pour les deux scénarios mentionnés précédemment sur toute la surface du globe.

Ainsi, un réchauffement plus important est à observé dans les latitudes élevées, principalement dû au déclin de la calotte glaciaire qui expose des terres nues au soleil plutôt que de renvoyer ses rayons vers l'espace. Les zones terrestre, surtout celles se trouvant à l'intérieur des continents, se réchauffent généralement plus fortement que les océans, qui réagissent thermiquement plus faiblement. Pour le scénario le plus pessimiste, il faut s'attendre à une augmentation des terres de l'ordre de +7°C en moyenne, alors que pour le scénario optimiste, ce réchauffement sera contenu en dessous des +2°C sur de larges parties de la surface terrestre.

Les précipitations annuelles moyennes montrent également des variations importantes à l'horizon 2100. Celles-ci devraient fortement augmenter dans les hautes latitudes ainsi que dans certaines zones autour de l'équateur. Cependant, les régions subtropicales ainsi que la région méditerranéenne devront faire face à une diminution des apports en pluie. Il existe plus de désaccord concernant la variation des régimes de précipitation selon les modèles de simulation. Selon le scénario RCP2.6 il existera peu de changements par rapport à aujourd'hui, mais dans le scénario RCP8.5 des changements allant de +30 à +50% sont attendus.

Le changement climatique futur implique d'autres conséquences non-énumérées ici. Elles concernent des changements régionaux dont nous ferons état pour la Suisse.

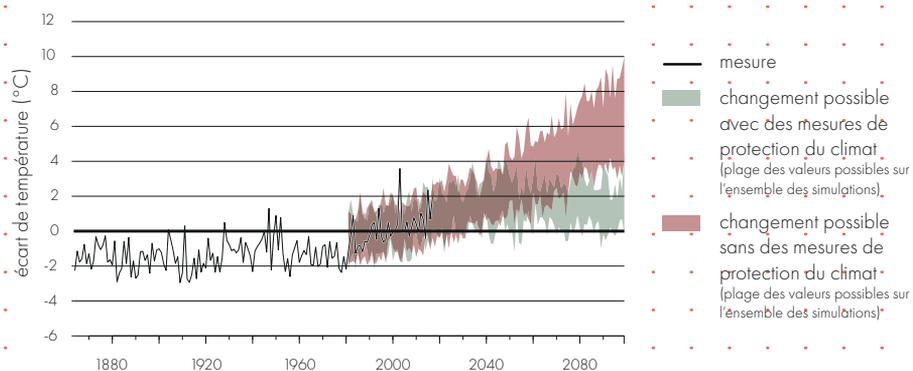
fig. 25 : distribution spatiale du changement de température prévu en 2100

fig. 26 : distribution spatiale du changement de précipitations prévu en 2100

période de référence :
1986 - 2005

source :
MétéoSuisse, « Changement climatique mondial », 2018, [En ligne]; de © IPCC AR5

[2] MétéoSuisse, « Changement climatique mondial », 2018, [En ligne]



En savoir plus :

Les scénarios climatiques CH2018 sont établis sur la base de travaux menés par le GIEC et considèrent différentes évolutions possibles des futures émissions de gaz à effet de serre.^[4] Les scénarios couvrent une plage de possibilités entre ces deux extrêmes : RCP 8.5 : sans mesure de protection du climat : aucune mesure d'atténuation est prise malgré les progrès scientifiques et technologiques. RCP 2.6 : avec des mesures significatives de protection du climat : les objectifs de l'Accord de Paris 2015 sont respectés et le réchauffement mondial est limité à +2°C par rapport à l'ère préindustrielle.

[4] MétéoSuisse, « Comprendre les scénarios climatiques », [En ligne], 2021

OBSERVATIONS FUTURES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

CONTEXTE SUISSE

fig. 27 : écart de la température moyenne suisse par rapport à la moyenne des années 1981-2010

« Dans le meilleur des cas, les plus grands efforts permettront de limiter le réchauffement de la Terre mais ne l'empêcheront pas. Les incidences du changement climatique, déjà perceptibles aujourd'hui, continueront de s'intensifier. La Suisse, en tant que pays alpin, est particulièrement touchée. C'est la raison pour laquelle nous devons nous préparer au changement climatique.^[3] »

En Suisse, MétéoSuisse, l'EPFZ et le Center for Climate Systems Modeling (C2SM) ont travaillé conjointement pour simuler les scénarios climatiques futurs du pays : ils sont nommés CH2018. Le rapport rassemble les évolutions possibles du climat d'ici 2060, voire 2085, en associant des simulations de modèles climatiques modernes à des observations sur les tendances actuelles. Ainsi, on peut s'imaginer avec plus de précision ce qui nous attend à l'avenir.

Sans trop de surprise, il faudra s'attendre à des étés secs, de fortes précipitations, plus de journées tropicales et des hivers peu enneigés. Cependant, le rapport donne aussi une lueur d'espoir en mettant en exergue les effets qu'auraient des mesures de protection du climat efficaces à échelle mondiale.

Voici un petit aperçu du contexte plein d'incertitudes dans lequel nous allons devoir évoluer. Mais si il y a bien une certitude parmi tout ça, c'est que le changement climatique est une réalité, et que chacun d'entre nous a une responsabilité à saisir pour améliorer la situation.

source :
© NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018

[3] Alain Berset, Président de la Confédération et chef du Département fédéral de l'intérieur, dans NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018



précipitations estivales

-25 à +10%
-40 à 0%



période de sécheresse estivale la plus longue

+0 à +9 jours
+1 à +9 jours

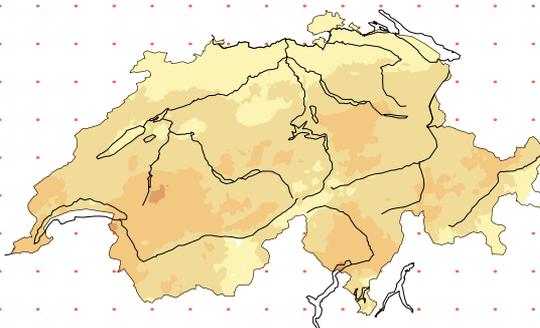
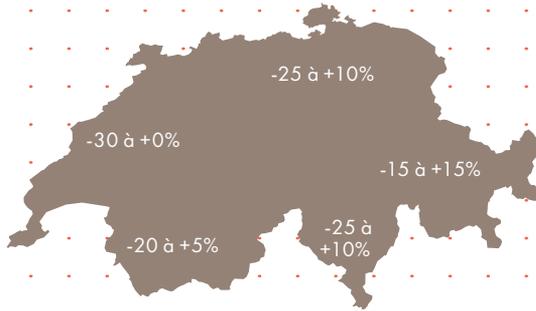


températures estivales

+2.5 à +4.5°C
+4 à +7°C

RCP8.5

RCP2.6



période de référence :
1981-2010

DES ÉTÉS SECS

changements possibles

en 2060
en 2085

données :
NCCS, « CH2018 - Scénarios
climatiques pour la Suisse », Zü-
rich, 2018.

**fig. 28 & 29 : évolution
attendue des précipi-
tations estivales
en 2085**

**fig. 30 & 31 : évolution
attendue des précipi-
tations estivales
en 2085**

source :
© NCCS, « CH2018 - Scéna-
rios climatiques pour la Suisse »,
Zürich, 2018

**fig. 32 : évolution at-
tendue des précipi-
tations estivales
en 2060**

source :
© NCCS, « Atlas web
CH2018 », 2018, [en ligne]

« À long terme, les quantités de précipitations moyennes diminueront et l'évaporation augmentera pendant les mois d'été. Les sols seront plus secs, les jours de pluie se feront plus rares et la plus longue période sans précipitations s'allongera.^[5] »

D'ici le milieu du siècle, la moyenne quotidienne des précipitations pendant l'été devraient rester similaire. Cependant, l'écart entre les jours de pluie devrait s'agrandir, ayant pour résultat des périodes de sécheresse pouvant durer en moyenne une semaine de plus qu'aujourd'hui. L'augmentation des températures de l'air allant de +2.5°C à +4.5°C entraînera une évaporation accrue de l'humidité dans le sol, ayant pour résultat des sols très secs, même si les précipitations ne diminuaient pas.

D'ici la fin du 21^{ème} siècle, les températures estivales pourraient atteindre +7°C que ce que l'on connaît aujourd'hui. Accompagné d'une réduction des précipitations allant jusqu'à -40%, les périodes de sécheresses les plus longues s'allongeront de 1 et 9 jours de plus qu'aujourd'hui.

Ces sécheresses toucheront divers domaines, tels que ceux de l'agriculture, de la production d'énergie et de la gestion de l'eau, sans compter les importants risques d'incendies engendrés.

Même avec des mesures de protection du climat efficaces à l'échelle planétaire, c'est à dire limiter la hausse des températures à +2°C par rapport à l'ère pré-industrielle selon l'Accord de Paris 2015, la température en Suisse continuera d'augmenter. Elle peut espérer un réchauffement global de moins de 4°C d'ici le milieu du siècle, correspondant à un réchauffement supplémentaire de +0.5 à +2.5°C que le réchauffement subit jusqu'à maintenant.

[5] NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018, p.6



cumul journalier maximal de précipitations par année

+10%			+10%
	hiver	été	
+20%			+10%

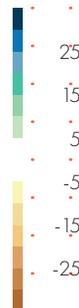
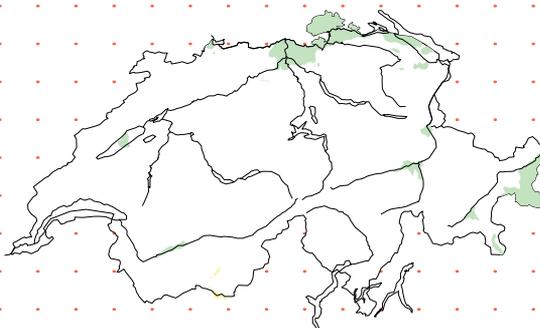
RCP8.5



cumul journalier maximal de précipitations sur 100 ans

+10%			+20%
	hiver	été	
+20%			+20%

RCP2.6



déviations (%)

période de référence :
1981-2010

DE FORTES PRÉCIPITATIONS

changements possibles

en 2060

en 2085

données :
NCCS, « CH2018 - Scénarios
climatiques pour la Suisse », Zü-
rich, 2018.

**fig. 33 & 34 : évolu-
tion attendue du cu-
mul journalier maxi-
mal de précipitations
sur 100 ans (hiver | été)
en 2060**

**fig. 35 & 36 : évolu-
tion attendue du cu-
mul journalier maxi-
mal de précipitations
sur 100 ans (hiver | été)
en 2085**

source :
© NCCS, « CH2018 - Scéna-
rios climatiques pour la Suisse »,
Zürich, 2018

**fig. 37 : évolution at-
tendue des précipita-
tions moyennes an-
nuelles en 2060**

source :
© NCCS, « Atlas web
CH2018 », 2018, [en ligne]

« Les fortes précipitations seront probablement nettement plus fréquentes et plus intenses que celles que nous connaissons aujourd’hui. Toutes les saisons seront concer- nées, mais plus particulièrement l’hiver. Les événements extrêmes rares avec des précipitations ne survenant qu’une fois tous les 100 ans seront également nettement plus intenses.^[6] »

L’air chaud est capable d’absorber environ 6% à 7% d’eau en plus par de- gré Celsius. La hausse globale des températures permet donc des mouve- ments de vapeur d’eau dans les nuages plus importants. Ceci a pour consé- quence naturelle des précipitations plus importantes, expliquant pourquoi depuis 1901 les événements extrêmes ont augmenté de 12%.

A l’avenir, cette tendance devrait se maintenir si le changement climatique n’est pas rapidement enrayé. On pourra s’attendre à ce que les plus fortes précipitations hivernales et estivales sur une journée s’intensifient de +10% supplémentaires d’ici 2060. En 2085, elles pourraient être de +10% en été et +20% en hiver. Les précipitations extrêmes avec une période de retour^[7] de 100 ans se renforceront également : +10% en hiver et +20% en été d’ici la moitié du siècle, et +20% pour toutes les saisons d’ici la fin du siècle, et ce malgré une tendance de diminution des précipitations en été sur le long terme.

Les fortes pluies pourront engendrer des dégâts matériels importants, comme conséquences de glissements de terrain ou d’inondations. Les contextes ur- bains seront fortement exposés à des ruissellements urbains important si leur sol reste aussi perméable qu’aujourd’hui.

Des mesures de protection du climat pourraient stabiliser le régime des pré- cipitations sur le long terme avec une réduction des précipitations de -15% en été et de +15% en hiver d’ici la fin du siècle.

[6] NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018, p.8

[7] événement qui ne survient de manière statistique que tous les x-années



jour le plus chaud de l'année

+2 à +5,5°C
+4 à +8,5°C

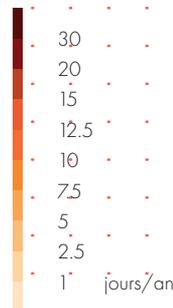
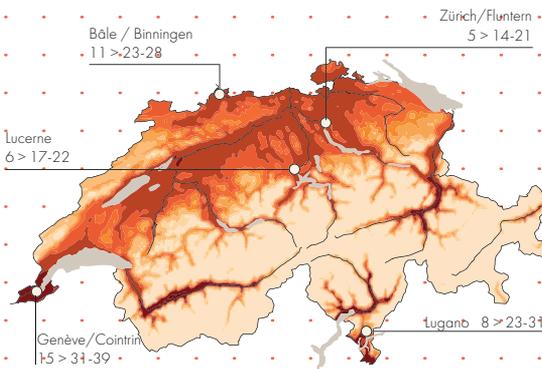
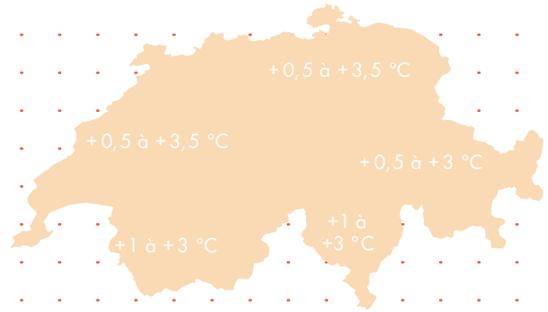


nombre de jours de forte chaleur

+3 à +17 jours
+12 à 37 jours

RCP8.5

RCP2.6



évolution attendue du nombre de jours avec des températures supérieures à 30°C vers 2060 par rapport à 1981-2010 (moyenne sur 30 ans) sans mesures de protection du climat. (texte original)

PLUS DE JOURNÉES TROPICALES

changements possibles

en 2060

en 2085

données :
NCCS, « CH2018 - Scénarios
climatiques pour la Suisse », Zü-
rich, 2018.

« Les températures maximales augmenteront bien davantage que les températures moyennes. Les vagues de chaleur ainsi que les journées et les nuits chaudes seront plus fréquentes et plus extrêmes. C'est dans les zones urbaines, densément peuplées et situées à basse altitude, que le stress thermique sera le plus fort.^[8] »

fig. 38 & 39 : évolution attendue du jour le plus chaud de l'année en 2060

Le rapport des scénarios climatiques CH2018 nous indique que les températures moyennes de la Suisse continueront d'augmenter au cours des prochaines décennies. Le réchauffement concernera toutes les saisons mais se fera le plus ressentir en été. Avec des émissions de gaz à effet de serre qui continuent d'augmenter comme maintenant, il fera jusqu'à 4.5°C plus chaud pendant la période estivale d'une année moyenne vers 2060.

Mais ce sont les températures maximales qui seront les plus difficiles à supporter. En 2060, la température des journées les plus chaudes d'un été moyen pourrait augmenter de +5.5°C par rapport à aujourd'hui et de +8°C d'ici la fin du siècle. Ces valeurs extrêmes s'expliquent par le fait que les sols moins humides auront plus de mal à se refroidir car ils n'ont plus d'eau à évaporer.

fig. 40 & 41 : évolution attendue du jour le plus chaud de l'année en 2085

Ainsi, le nombre de jours de fortes chaleur^[9] par années pourrait augmenter de 3 à 7 jours d'ici le milieu du siècle, et de 12 à 37 jours d'ici la fin du siècle. Aujourd'hui, ces jours de forte chaleur ne se produisent en moyenne qu'une seule fois par année.

Ce sont les zones en basse altitude qui connaîtront les phases de stress thermique les plus nombreuses pour les hommes comme pour les animaux. « L'effet combiné des températures élevées et de l'humidité de l'air empêchera la température du corps de redescendre à une température agréable.^[10] » Les régions fortement urbanisées seront les plus exposées à de très fortes températures, notamment la nuit à cause des effets d'îlots de chaleur urbain.

fig. 42 : évolution attendue du nombre de journées tropicales en 2060

Une baisse drastique des émissions de GES aura pour conséquence une augmentation des températures estivales de seulement +1 à +1.5°C pour tout le siècle. On devrait compter seulement 1 à 9 jours de très forte chaleur d'ici 2060 et 2 à 8 jours d'ici 2085.

source :
© NCCS, « CH2018 - Scénarios
climatiques pour la Suisse »,
Zürich, 2018

[8] NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018, p.10

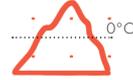
[9] au delà de 30°C

[10] NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018, p.10



températures hivernales

+2 à +3,5 °C
+3 à +5,5 °C

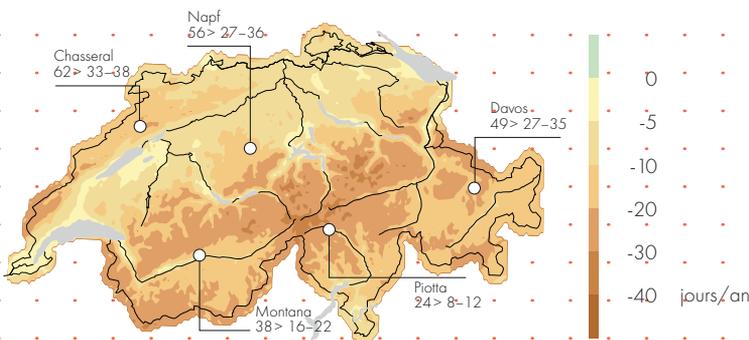
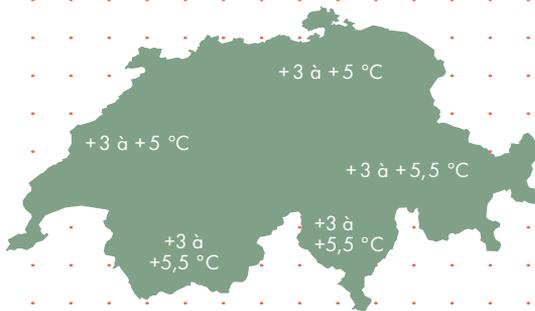
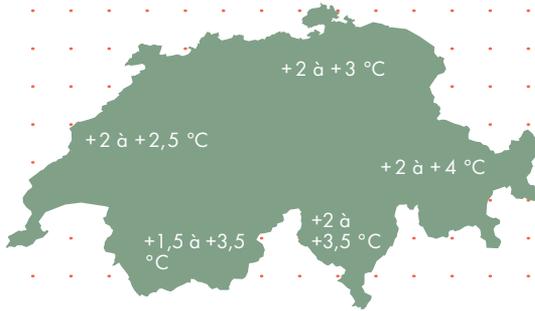


hausse de l'altitude de l'isotherme du degré zéro en hiver

+400 à +650m
+700 à +1050m

RCP8.5

RCP2.6



évolution attendue du nombre de jours de neige fraîche vers 2060 par rapport à 1981-2010 (moyenne sur 30 ans), sans mesures de protection du climat.

DES HIVERS PEU ENNEIGÉS

changements possibles

en 2060

en 2085

données :
NCCS, « CH2018 - Scénarios
climatiques pour la Suisse », Zü-
rich, 2018.

« Les hivers seront, eux aussi, nettement plus doux au milieu du siècle. Il y a aura certes plus de précipitations, mais surtout sous forme de pluie du fait de la hausse des températures. Dans les régions de basse altitude, il neigera moins et plus rarement. Les zones enneigées diminueront donc fortement en Suisse.^[11] »

fig. 43 & 44 : évolution attendue des températures hivernales en 2060

Nous l'avons vu précédemment, les glaciers alpins ont déjà perdu 60% de leur volume depuis 1850. Depuis 1970, le nombre de jours de neige a été divisé par deux dans les zones au-dessous de 800m d'altitude.

Deux processus opposés vont affecter les chutes de neige : d'une part la hausse des températures entraînera une augmentation des précipitations sous forme de pluie et d'autre part la hausse globale des précipitations hivernales. Cela repoussera l'isotherme du degré zéro moyen qui est aujourd'hui de 850m d'altitude à plus de 1'500m d'altitude. Il en résultera une nette baisse de la couverture neigeuse du pays. La neige en plaine se fera rare : en dessous de 1'000m d'altitude elle fondra de moitié d'ici le milieu du siècle, et de près de 80% d'ici la fin du siècle. Les zones de haute altitude seront également affectés et devront compter sur une diminution générale des chutes de neige, surtout au printemps. Celle-ci aura un grand impact sur les glaciers qui ne seront plus alimentés et verront leur fonte s'accélérer.

fig. 45 & 46 : évolution attendue des températures hivernales en 2085

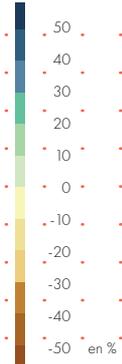
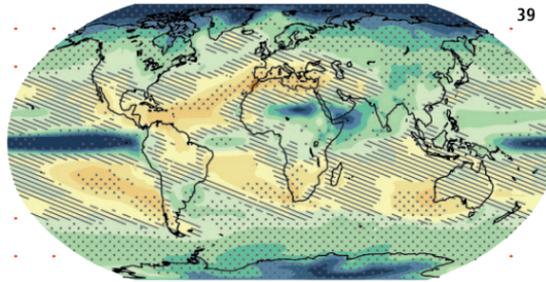
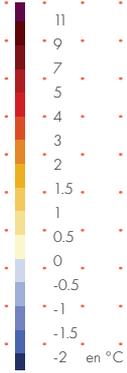
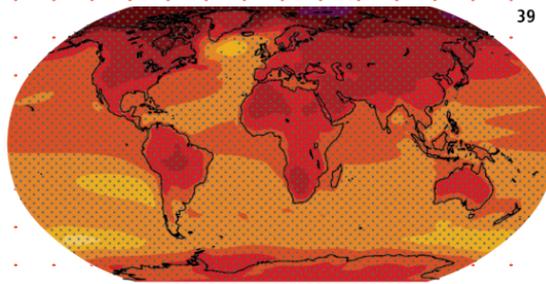
Tout comme les fortes précipitations, cela mettra à rude épreuve les infrastructures du pays. La baisse de la couverture neigeuse affectera le tourisme hivernal, ainsi que le domaine des transports ou de la production d'énergie hydraulique.

Avec un changement climatique contrôlé, la hausse des températures hivernales pourra être limité entre +0.5 et +2°C. Des chutes de neige en plaine pourront encore ravir petits et grands.

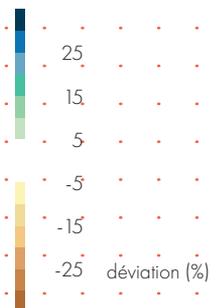
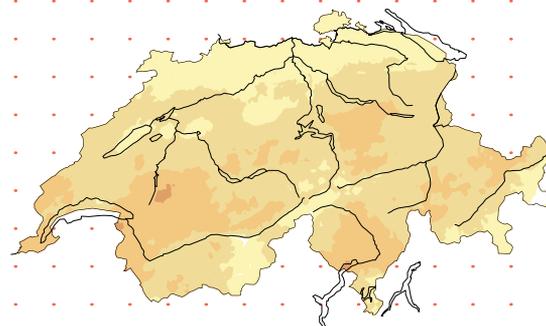
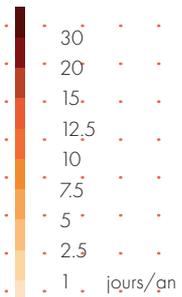
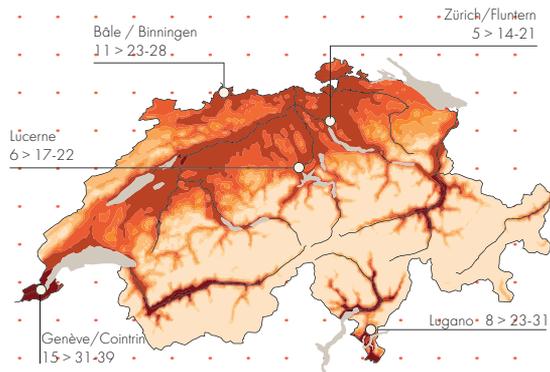
fig. 47 : évolution attendue du nombre de jours de neige fraîche en 2060

source :
© NCCS, « CH2018 - Scénarios
climatiques pour la Suisse »,
Zürich, 2018

[11] NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », Zürich, 2018, p.12.



période de référence :
1986 - 2005



période de référence :
1981-2010

SYNTHESE

fig. 25 : distribution spatiale du changement de température prévu en 2100

fig. 26 : distribution spatiale du changement de précipitations prévu en 2100

source :
MétéoSuisse, « Changement climatique mondial », 2018, [En ligne]; de © IPCC AR5

fig. 42 : évolution attendue du nombre de journées tropicales en 2060

fig. 32 : évolution attendue des précipitations estivales en 2060

source :
© NCCS, « Atlas web CH2018 », 2018, [en ligne]

QUAND L'HOMME CONTINUE DE TOUT CHAMBOULE : OBSERVATIONS FUTURES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les conséquences des fortes émissions de gaz à effet de serre et autres pollutions engendrées par l'homme sont déjà perceptibles aujourd'hui, et le seront encore plus demain. Il est possible d'émettre divers scénarios climatiques pour l'avenir, basés sur des estimations des futures émissions de gaz à effet de serre de la part de l'homme. Ils sont appelés RCP pour *Representative Concentration Pathways*, où le RCP2.6 indique le meilleur scénario possible où des mesures efficaces de lutte contre le changement climatique sont entreprises, et le RCP8.5, pire scénario imaginable, où aucune action climatique n'est entreprise.

Sans surprise, le réchauffement climatique se poursuivra à l'avenir. L'augmentation de la température de surface globale de la terre devrait se trouver entre +1 et +4°C par rapport à aujourd'hui, soit +2 à +5°C par rapport à l'ère préindustrielle. Tandis que l'augmentation des températures s'effectuera de manière plus ou moins homogène, ce n'est pas le cas pour les changements affectant les précipitations. Le régime de précipitation continuera de changer de manière globale, mais la distribution spatiale de ces changements est très différente. Elle est fortement influencée par les différentes caractéristiques régionales d'un climat.

L'avenir climatique suisse dépend donc de l'évolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Les scénarios climatiques nationaux CH2018 indiquent que même avec des mesures de protection du climat, un réchauffement supplémentaire de +0.5 à +2.5°C d'ici la fin du siècle dans le meilleur des cas. Sans mesures, ce réchauffement pourrait être de l'ordre de +6.8 à +8.9°C. Les principaux changements à prévoir sont des étés plus secs et plus chauds, des fortes précipitations plus nombreuses et plus intenses, ainsi que des hivers peu enneigés.

Une protection du climat appropriée permettra d'enrayer près de la moitié des conséquences possibles sur le climat en Suisse d'ici à 2060, et près des deux tiers d'entre elles d'ici à 2100.

CONSTAT POLITIQUE

Monde

1990

publication du premier rapport du GIEC sur les changements climatiques

1992

adoption de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)

1997

adoption du Protocole de Kyoto

des objectifs contraignants de réduction des émissions sont fixés pour les pays industrialisés. Ils s'engagent à réduire leurs émissions de GES de 5.2% en moyenne par rapport à 1990.

2008

première période d'engagement du Protocole de Kyoto

2012

2013

deuxième période d'engagement du Protocole de Kyoto

seul un faible nombre de pays sont prêts à s'engager pour une deuxième période : l'Australie, l'Union Européenne, la Croatie, l'Islande, le Lichtenstein, Monaco, la Norvège et la Suisse

2015

Adoption de l'Accord de Paris

l'objectif principal de cet accord est de contenir le réchauffement mondial moyen nettement en dessous de 2°C. Tous les pays ayant ratifié l'accord sont tenus de définir un objectif de réduction national et de faire un rapport sur leurs activités de mise en œuvre tous les deux ans.

2020

2021

Mise en œuvre de l'Accord de Paris
Adoption de l'Accord de Glasgow

Suisse

2003

ratification du Protocole de Kyoto

2008

introduction de la taxe sur le CO₂

contrairement à l'UE, la Suisse s'engage à réduire ses émissions de GES de 8% au lieu de 5.2% par rapport à 1990 pour la période de 2008 à 2012.

2012

2013

entrée en vigueur de la loi sur le CO₂ révisée

la Suisse s'engage à réduire ses émissions de GES de 20% par rapport à 1990 d'ici à 2020.

2017

ratification de l'Accord de Paris

2019

le Conseil fédéral décide d'un objectif de zéro émission nette pour tous les GES d'ici à 2050.

2020

rejet de la nouvelle loi sur le CO₂

elle visait une réduction des émissions de 30% d'ici 2030 par rapport à 1990. Les instruments de la loi actuelle doivent être prolongés jusqu'à une nouvelle réforme en 2022

2050

zéro émission nette

CONSTAT POLITIQUE

POLITIQUE CLIMATIQUE SUISSE ET INTERNATIONALE

fig. 48 : schéma chronologique des principales politiques climatiques mondiales et suisses

Cela fait des décennies que les scientifiques nous avertissent du changement climatique et qu'ils n'ont pas été écoutés. Aujourd'hui, les États prennent enfin conscience de l'urgence climatique et définissent des lois, accords et autres. Mais quels sont les outils d'action des gouvernements concernant la réduction des émissions?

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques CCNUCC, le Protocole de Kyoto et l'Accord de Paris constituent les réponses politiques de la communauté internationale face au changement climatique. Ces accords sont une base permettant de fixer des objectifs contraignant pour chaque pays afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. La Suisse aussi s'est engagée au niveau international à respecter ces accords. « La loi sur le CO₂ constitue la base légale la plus importante en vue d'atteindre les objectifs de réduction de la Suisse »^[1]. La figure ci-contre présente une vue d'ensemble de l'évolution de la politique climatique suisse et internationale.

La publication en 1990 du premier rapport du GIEC sur les changements climatiques a suscité une première prise de conscience face à l'urgence climatique. La première réaction des gouvernements a été de formuler la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dont découle en 1997 le Protocole de Kyoto. Les états l'ayant ratifié s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre conformément à leurs objectifs fixés (5.2% pour l'Union Européenne) par rapport à 1990 pour la période de 2008 à 2012.

source : adapté à partir de OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020.

[1] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020, p.77.

La Suisse ratifie le Protocole de Kyoto en 2003. Elle établit des objectifs plus ambitieux que l'Union Européenne en visant une réduction des émissions de 8% pour la même période.

Cette première période d'engagement de 2008 à 2012 n'ayant qu'un faible succès, seulement quelques pays s'enrôlent dans une deuxième période d'engagement du Protocole de Kyoto, dont la Suisse et les pays membres de l'Union Européenne.

En Suisse, les mesures prises à échelle internationale sont mises en œuvre dans le cadre de la Loi sur le CO₂.

Ainsi, les objectifs de la première période d'engagement de 2008 à 2012 du Protocole de Kyoto ont été fixés dans la première loi sur le CO₂, entrée en vigueur en 2000. Ces objectifs annonçaient notamment une réduction des émissions de CO₂ de 10% par rapport à 1990, ce qui a été atteint de manière globale, mais pas dans les détails.

« La loi sur le CO₂ a ensuite été révisée afin de couvrir la deuxième période d'engagement du Protocole de Kyoto de 2013 à 2020. La loi révisée fixe un objectif de réduction de 20 % (somme de toutes les émissions de gaz à effet de serre et non plus uniquement celles de CO₂) par rapport à 1990 d'ici à 2020 »^[2]. Cet objectif doit entièrement être atteint au travers de mesures prises en Suisse, et plus à l'étranger comme ce fut le cas pour la première période d'engagement. Les dernières données sur les émissions de CO₂ en Suisse disponibles datant de 2019 (malgré des publications datant de 2021), il n'est pas possible de dire avec certitude si les objectifs à atteindre en 2020 ont été maintenus ou non. Mais selon divers rapports et analyses dont certains de l'Office Fédéral de l'Environnement, les données de l'inventaire national des gaz à effet de serre pour 2020 (portant sur les émissions jusqu'en 2018) laissent à penser que ces objectifs ne seront vraisemblablement pas atteints^[3]. Les objectifs sectoriels pour 2020 (par rapport à 1990) étant:

- -40% pour le secteur du bâtiment
- -15% pour le secteur de l'industrie
- -10% pour le secteur du transport
- -10% pour les autres sources d'émission (agriculture, gaz synthétiques, déchets)

En 2018, il manquait encore 5% de réduction sur les 20% à atteindre pour répondre aux objectifs fixés. Cela représente tout de même 3.42 mio. t eqCO₂^[4].

L'Accord de Paris a été adopté le 12 décembre 2015 par les 196 Etats membres de la CCNUCC (représentant 96% des émissions finales) lors de

[2] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020, p.79.

[3] OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020.

[4] selon L. Jorio et P. Turuban, « La Suisse réduit ses émissions de CO₂, mais pas assez vite », 2020, [En ligne].

la COP21. Cet accord vise en premier lieu à contenir le réchauffement climatique global en dessous de +2°C par rapport aux niveaux préindustriels, et à poursuivre les actions pour limiter l'évolution des températures à +1.5°C. Il doit également prévoir le renforcement des capacités d'adaptation et de résilience des pays face au changement climatique, tout en rendant les flux financiers compatibles avec de tels objectifs climatiques.^{[5][6]} Contrairement au Protocole de Kyoto, cet accord ne fait plus de distinction entre pays industrialisés et en développement. Ainsi, tous les pays signataires se doivent de respecter leurs engagements en fixant des objectifs de réduction nationaux, en les renforçant périodiquement et en en rendant compte tous les deux ans. Tous les cinq ans, un bilan international des progrès accomplis est réalisé, attestant de la réalisation des objectifs de l'accord, ou non.

À nouveau, la Suisse a salué son engagement à l'international en ratifiant l'Accord de Paris en 2017. Elle s'y est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de moitié par rapport à 1990 et vise la neutralité carbone d'ici 2050. La mise en œuvre de ces engagements a nécessité une nouvelle révision de la Loi sur le CO₂ pour la période de 2021-2030. Cependant, la nouvelle Loi sur le CO₂ a été rejetée par le peuple Suisse lors d'un référendum, s'opposant à de nouvelles réglementations, notamment une taxe sur les billets d'avion.

« La politique climatique de la Suisse n'est pas assez ambitieuse, déplorent les organisations environnementales et les militants du climat, qui ont repris les manifestations dans les villes du pays après la pause pandémique. Mais les critiques viennent désormais aussi de l'extérieur », rapporte Luigi Jorio dans un article pour Swissinfo^[7].

[5] Ministère de la transition écologique, « Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde », Paris, 2020.

[6] Conseil d'État, « Plan climat vaudois », Epalinges, 2020.

[7] L. Jorio, « La contribution «décevante» de la Suisse à une planète sans émissions de CO₂ », Swissinfo, 2021, [En ligne].

Suisse

2003

ratification du Protocole de Kyoto

2008

introduction de la taxe sur le CO₂

contrairement à l'UE, la Suisse s'engage à réduire ses émissions de GES de 8% au lieu de 5,2% par rapport à 1990 pour la période de 2008 à 2012.

2012

2013

entrée en vigueur de la loi sur le CO₂ révisée

La Suisse s'engage à réduire ses émissions de GES de 20% par rapport à 1990 d'ici à 2020.

2017

ratification de l'Accord de Paris

2019

le Conseil fédéral décide d'un objectif de zéro émission nette pour tous les GES d'ici à 2050.

2020

rejet de la nouvelle loi sur le CO₂

elle visait une réduction des émissions de -50% d'ici 2030 par rapport à 1990. Les instruments de la loi actuelle doivent être prolongés jusqu'à une nouvelle réforme en 2022

2050

zéro émission nette

Vaud et Lausanne

2020

adoption du plan climat vaudois 1ère génération

zéro émission nette d'ici à 2050

-50 à -60% des émissions de GES d'ici à 2030

2021

adoption du plan climat lausannois

-100% des émissions directes d'ici à 2050

-70% des émissions directes d'ici à 2070

-100% des émissions directes d'ici à 2050

zéro émissions directes dans le domaine de la mobilité d'ici à 2030

2030

2040

2050

zéro émission nette

CONSTAT POLITIQUE

POLITIQUE CLIMATIQUE VAUDOISE ET LAUSANNOISE

Mais alors que la population suisse fait machine arrière concernant des mesures de restrictions d'émissions, certains cantons et même grandes villes suisses proposent leurs propres plans climats.

fig. 49 : schéma chronologique des principales politiques climatiques suisses et lausannoises

Comme de nombreux autres cantons aujourd'hui, le canton de Vaud a en juin 2020 présenté son premier plan climat. Il était l'un des objectifs prioritaires de son programme de législature 2017 à 2020. Ce plan climat vise à « orienter, soutenir, renforcer et compléter les moyens engagés^[8] » des politiques publiques de l'État déjà existantes.

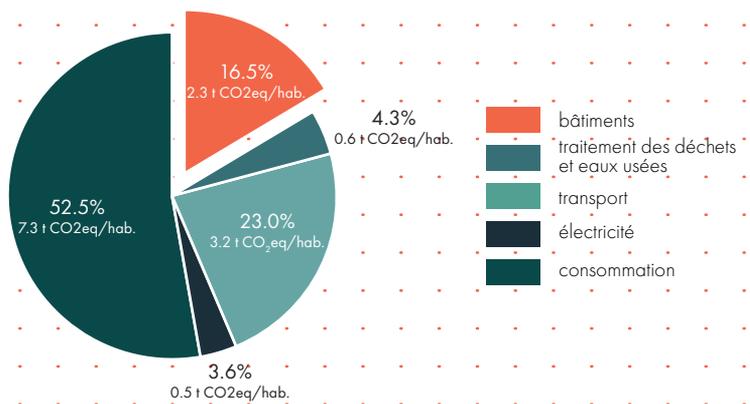
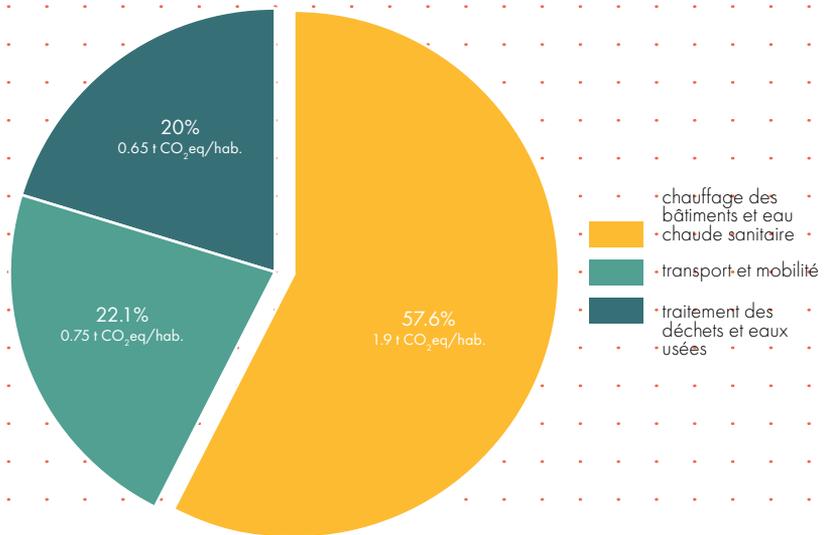
Ses objectifs s'articulent autour de trois axes stratégiques : réduire, adapter et documenter. Le premier axe vise la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur le territoire cantonal de l'ordre de -50 à -60% d'ici 2030. Le canton s'engage, tout comme le reste de la Suisse, à viser la neutralité carbone au plus tard en 2050. Le deuxième axe concerne la stratégie d'adaptation. Préparer les systèmes humains et naturels aux effets des changements climatiques permet de réduire ses vulnérabilités sur le long terme. Enfin, l'axe documenter permet d'évaluer la mise en œuvre du Plan climat au travers de l'analyse de l'impact des changements climatiques sur le territoire.

A ce jour, l'effort cantonal total pour le climat s'élève à près de 1.347 milliards CHF^[9].

sources : adapté à partir de OFEV, « Changements climatiques en Suisse », Berne, 2020.
données : Lausanne, « plan climat lausanne », Lausanne, 2021.
Conseil d'état, « plan climat vaudois », Epalinges, 2020.

[8] Conseil d'État, « Plan climat vaudois », Canton de Vaud, Epalinges, 2020, p.6.

[9] Conseil d'État, « Plan climat vaudois », Canton de Vaud, Epalinges, 2020.



La ville de Lausanne présente en janvier 2021 son propre plan climat. Inspiré par le plan climat de la ville de Genève annoncé en février 2020, Lausanne aussi réagit après avoir fait un état des lieux de ses modes de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre.

De cet état des lieux résulte un constat choquant. Un lausannois émet en moyenne 13.9 tonnes d'équivalent CO₂ par habitant en 2019^[10], soit un peu plus que la moyenne suisse annoncée par WWF (13.5 t eqCO₂/hab./an)^[11]. Seulement 3.3 tonnes d'équivalent CO₂ par habitant des 13.9 sont générés sur le sol lausannois, soit environ 30%. « Les autres 70% sont des émissions générées à l'étranger, comparables littéralement à de la pollution 'délocalisée' », fustige le conseiller communal UDC F. Moscheni^[12], dénonçant la Ville de Lausanne de manquer sa cible.

L'adoption d'un plan climat reste cependant une action allant dans le bon sens. Sa stratégie s'oriente selon un horizon 2030 et un horizon 2050. Le premier objectif fixé concerne la mobilité. Lausanne vise zéro émission directe provenant de la mobilité dès 2030. Pour cela, elle souhaite revoir la répartition de ses modes de transports et être une des premières villes en Suisse à bannir les véhicules thermiques.

Son deuxième axe stratégique concerne les bâtiments. D'ici 2050, 75% des ménages devront être alimentés par le chauffage à distance, avec une énergie 100% renouvelable. La ville souhaite également faire passer le taux de rénovation du parc immobilier lausannois de 1 à 3.3% pour les 30 prochaines années, baissant de 60% les émissions des bâtiments. L'effet combiné du renouvellement des enveloppes thermiques des bâtiments et la décarbonisation du chauffage à distance devraient permettre d'atteindre l'objectif de neutralité carbone de ce secteur d'ici 2050^[13].

A ces deux axes principaux s'ajoutent d'autres mesures, telles que l'augmentation de 50% de la surface végétalisée sur le territoire afin de mieux supporter l'augmentation des températures en ville^[14].

fig. 50 : émissions directes de CO₂ par secteur à Lausanne

fig. 51 : émissions totales de CO₂ par secteur à Lausanne

données :
Ville de Lausanne, « Plan Climat Lausanne », Lausanne, 2021.

[10] Ville de Lausanne, « Plan Climat Lausanne », Lausanne, 2021.

[11] WWF, « Footprint - évaluation détaillée », 2021.

[12] F. Moscheni, « Plan climat: la Ville de Lausanne a-t-elle un plan B? », 24 Heures, 2021, [En ligne].

[13] Ville de Lausanne, « Plan Climat Lausanne », Lausanne, 2021.

[14] à ce titre voir : Pellet et al., « Arborisation urbaine lausannoise et changements climatiques », 2021.



SYNTHESE

LA POLITIQUE CLIMATIQUE

Les États prennent enfin conscience de l'urgence climatique et définissent des lois, accords et autres. Ces accords, comme la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques CCNUCC, le Protocole de Kyoto ou l'Accord de Paris, constituent des bases permettant de fixer des objectifs contraignants pour chaque pays. Ces mesures prises à l'échelle internationale sont mises en œuvre au travers de textes de loi, formant la base légale pour les différentes actions.

En Suisse, ces mesures sont mises en œuvre dans le cadre de la Loi sur le CO₂. Elle avait défini des objectifs sectoriels pour 2020 avec des réductions d'émissions de gaz à effet de serre de -40% pour le bâtiment, -15% pour l'industrie, -10% pour les transports, -10% pour les secteurs réstants, par rapport à 1990. Ces objectifs ont vraisemblablement été manqués, mais il manque à l'heure actuelle le rapport correspondant pour en attester. La politique climatique suisse repose sur deux piliers : la réduction des émissions de GES et l'adaptation aux changements climatiques. En effet, selon le GIEC, « l'atténuation et l'adaptation sont des stratégies complémentaires qui permettent de réduire et de maîtriser les risques liés aux changements climatiques^[1] » Mais la voie vers une réduction nationale des émissions de GES d'au moins 50% pour 2030 n'est pas facile, comme en atteste le rejet de la révision de la Loi sur le CO₂ en juin 2021.

C'est donc à l'échelle cantonale et communale que le combat climatique se poursuit. Le Canton de Vaud offre son soutien aux communes au travers de son plan climat vaudois. Lausanne, capitale vaudoise, affirme ses ambitions au travers d'un plan climat sur sa propre commune. Après une analyse de son comportement d'émissions de GES, il en résulte qu'un lausannois émet en moyenne 13.9 tonnes d'équivalent CO₂ par habitant en 2019, soit un peu plus que la moyenne suisse, dont 70% sont des émissions générées à l'étranger. Néanmoins, la ville cible uniquement les émissions sur son territoire, notamment au travers des objectifs zéro émissions provenant de la mobilité en 2030 et zéro émissions des bâtiments en 2050. Une augmentation de 50% de la surface végétalisée sur le territoire lausannois est également prévue.

[1] GIEC/OMM, « Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante », GIEC, Genève, Suisse, communiqué de presse, août 2021.

PROBLÉMATIQUE

**COMMENT
MINIMISER LES
IMPACTS DU
CHANGEMENT
CLIMATIQUE ET
ADAPTER NOTRE
ENVIRONNEMENT
CONSTRUIT À UN
FUTUR INCERTAIN?**

PROBLÉMATIQUE

ET SI LE CO₂ INITIAIT UNE PRISE DE CONSCIENCE ARCHITECTURALE?

Les cours de théorie de l'architecture à l'EPFL nous ont appris les fondements de l'architecture d'aujourd'hui : comment la cabane primitive de l'abbé Laugier marque l'origine de l'architecture et de sa pratique, comment Vitruve définit cette discipline sous les conditions de solidité (*firmitas*), d'utilité (*utilitas*) et de beauté (*venustas*), comment Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc grave toute une époque dans la pierre de ses édifices; on parlait, de Alberti et de Brunelleschi, de Franck Lloyd Wright et d'Adolf Loos en passant par Le Corbusier et Mies Van Der Rohe.

Mais peut-être aurait-il fallu également passer du temps sur les théories de Robert Venturi et l'impact de l'air conditionné sur l'uniformisation de l'architecture, ou bien celles de Philippe Rahm prônant une nouvelle pratique architecturale, qui retrouve ses fondamentaux climatiques, énergétiques et sanitaires perdus?

Les traités de Vitruve et de Leon Battista Alberti nous transmettent qu'il faut prêter une attention particulière au lieu et au climat d'implantation d'une bâtisse, car l'être humain est fragile face à la nature. Selon Vitruve, le lieu pour bâtir une ville « ne doit pas être sujet aux brouillards et aux bruines; doit avoir une bonne température de l'air, une exposition correcte au soleil.^[1]»

Mais cela étaient les paroles d'hommes qui étaient bien loin de s'imaginer ce que l'être humain était capable d'achever. C'était un monde préindustriel, bien avant que soient inventés la machine à vapeur, l'automobile, l'avion, le réfrigérateur ou encore l'ordinateur; bien avant que l'on se trouve dans « un contexte d'accès massif et facile à l'énergie, celle du charbon puis du pétrole [...] »^[2].

Le progrès technique et technologique? Oui! Mais à quel prix?

[1] Vitruve, « Les dix livres d'architecture de Vitruve », Paris, E. Tardieu et A. Coussin, 1837m livre V; dans P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.233.

[2] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, quatrième de couverture

Nous l'avons vu précédemment : le changement climatique est la conséquence des émissions de gaz à effet de serre produits par l'homme. Lui seul est responsable du +2°C vers lequel tend notre planète actuellement. C'est lui qui est responsable du fait que nous allons à la fois devoir gérer des périodes de grande sécheresse et des périodes de précipitations extrêmes. En réalité, le futur est bien plus incertain que la simple affirmation d'un réchauffement de +2°C, mais une chose est certaine : nous subissons aujourd'hui les décisions prises dans le passé. Mais nous avons aujourd'hui plus de connaissances et de pouvoir pour faire avancer les choses que nous avons auparavant.

La politique climatique internationale et suisse repose sur deux piliers: la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'adaptation aux changements climatiques^[3]. L'humain se retrouve à devoir gérer à la fois les ressources naturelles et les ressources humaines, dont l'énergie est probablement la plus importante.

La stratégie de réduction et d'adaptation s'applique également au domaine de l'architecture et de l'urbanisme. Pour Philippe Rahm, « l'architecture, c'est l'art de construire des climats »^[4]: construire un climat pour que l'homme puisse vivre n'importe où sur cette planète, ou même au-delà. Mais c'est enfin de compte aussi l'art de permettre la vie. L'architecture est ce qui nous permet d'avoir un avenir, car un architecte ne construit pas seulement pour aujourd'hui, mais aussi pour demain. Un bâtiment est érigé maintenant mais il doit pouvoir répondre aux besoins dans 50ans, 100ans, voire plus, aussi incertain que cet avenir puisse être.

Vitruve avait raison, l'homme seul est fragile face à la nature. Mais l'architecture a toujours eu pour but de protéger ses habitants, et nous pouvons nous donner les moyens d'en faire autant. Nous sommes conscient des proportions que peut prendre le climat à l'horizon 2060/2085. Et nous sommes également conscient des objectifs que le secteur du bâtiment doit atteindre afin de limiter le réchauffement climatique. Il doit en premier lieu dépasser sa dépendance aux énergies fossiles, réduire ses émissions de CO₂ à zéro, contrer les périodes de très fortes chaleur, de sécheresse ou de très fortes précipitations.

Avec ces informations en main, nous pouvons isoler un problème majeur auquel sera confronté le secteur du bâtiment : l'augmentation des températures globales et extrêmes, ainsi que la longueur de ces périodes de forte chaleur qui entraînera une surchauffe des espaces intérieurs.

La surchauffe des espaces devient un problème important quand la température intérieure reste élevée sur plusieurs jours consécutifs et ne permet plus à la température du corps de redescendre. Dans des cas extrêmes, elle peut

[3] voir chapitre « constat politique »

[4] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.279

entraîner la mort. La climatisation n'est pas une solution viable à long terme. Quels sont les outils de l'architecte pour concevoir des espaces intérieurs et extérieurs qui exploitent le potentiel climatique d'un site? Quelles conséquences ces aménagements ont sur leur contexte immédiat? Que peut nous apprendre le passé et la thermodynamique des fluides?

L'architecture doit se réinventer et trouver sa place dans notre existence comme un élément durable. Les décisions prises dans le développement d'une construction aujourd'hui ne doivent pas avoir d'impact négatif pour les générations futures, que ce soit sur un plan économique, social ou écologique. Dès lors, se protéger des fortes chaleurs en ayant recours à la climatisation n'est plus une solution. Leur caractère polluant ne le permet plus. Les climatiseurs sont aujourd'hui, avec les ventilateurs, responsables de 10% de la consommation d'électricité totale^[5] selon la l'IEA, la *International Energy Agency*. En 2017, on comptait à Taïwan pas moins d'un appareil pour vingt-trois habitants, tandis qu'en France on en comptait un pour cent vingt-cinq habitants^[6]. Certes, les climats sont différents, mais l'IEA prévoit un triplement du nombre de climatiseurs installés dans les dix ans à venir. Trouver des solutions de rafraîchissement passives devient donc une nécessité.

« La durabilité d'un bâtiment ou d'une opération d'aménagement ne se trouve pas dans une gadgétisation technique, une surenchère de systèmes greffés sur des édifices non pensés dans un sens environnemental ou durable, mais dans une réflexion sur des stratégies et des dispositifs urbains, architecturaux et constructifs, qui souvent coûtent peu mais ont un impact réel et tangible^[7]» (Franck Boutté, ingénieur architecte, consultant HQE).

Je rejoins entièrement la vision de Franck Boutté, dont nos chemins se sont croisés pendant mon stage chez Lina Ghotmeh – Architecture. Les solutions apportées doivent être simples et d'une efficacité redoutable. Sans cela, impossible de maintenir la consommation d'énergie d'un bâtiment au plus bas.

Mais la stratégie d'adaptation concerne non seulement un objet construit à l'échelle d'une ville ou d'un bâtiment, mais aussi l'occupant de ce contexte. Dès lors, tout principe de rafraîchissement ou de gestion thermique est indissociable d'un contexte social, car ils ont un but commun : protéger l'homme des aléas climatiques. Ainsi réapparaît un terme employé par le philosophe Peter Sloterdijk : le *socialisme thermique*. Bien qu'à l'origine ce terme désigne plutôt le rassemblement au 17^{ème} siècle de personnes dans un lieu chaud tel un café, le rassemblement dans un lieu frais pourrait également y correspondre. La réunion et la rencontre de personnes dans un

[5] « The Future of Cooling – Analysis », IEA [en ligne], 2018, [consulté le janv. 08 2022].

[6] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020.

[7] F. Boutté, « Durable en ville, vers une conception architecturale et technique renouvelée », dans Architecture = durable, Paris: Éditions Pavillon de l'Arsenal : Éditions A. & J. Picard, 2008.

but thermique a disparu avec l'accès inépuisable à l'énergie, en faveur de modes de chauffage et de climatisation individuels. Mais le changement climatique pourrait changer la donne, en incitant à renoncer à s'équiper de manière individuelle au profit de sources de chaleur ou de fraîcheur communes. A l'image des forums antiques, nos villes ont plus que jamais besoin d'îlots de fraîcheur urbains, ce qui pourrait à terme, requalifier l'espace public et en conséquence, le rapport entre ses usagers.

Comment minimiser les impacts du changement climatique et adapter notre environnement à un futur incertain?

Voici une question à laquelle je souhaite apporter des réponses dans la suite de cet écrit. Mais avant d'exposer ces outils que tout concepteur du bâti peut saisir, il faut comprendre que le climat, peu importe ce qu'il nous réserve, n'est pas une contrainte, mais lui aussi un outil. Le changement climatique n'est pas une catastrophe, si on le voit comme une opportunité architecturale : il permet d'exprimer ses volontés de changement, d'émancipation, d'innovation et d'exploration ainsi que de créativité. Il offre une possibilité de construire un nouvel imaginaire.

PLAN ET MÉTHODOLOGIE

Le sujet mentionné se concentre donc sur des solutions architecturales afin de remédier à l'augmentation des températures et au changement du régime de précipitations. En réalité, l'analyse climatique mondiale et suisse fait déjà amplement parti du sujet abordé, car elle met en exergue la nécessité pour les architectes et urbanistes d'agir face au changement climatique. Tout projet conçu doit être réalisé avec la conscience, que chacune de nos décisions prise aujourd'hui a un impact sur l'avenir.

Dans le cadre de cet énoncé théorique, nous nous plaçons dans un contexte futur, avec un climat chaud et sec, comme celui que nous pourrions connaître dans le canton de Vaud d'ici 2065^[8].

La fonction première d'un bâtiment a été mentionnée : protéger ses occupants. Le changement climatique entraîne de nombreux changements, mais l'un d'entre eux impactera particulièrement le secteur du bâtiment : le rafraîchissement des espaces.

[8] voir « un scénario pour le canton de Vaud »

Pour répondre à cette problématique, nous explorerons brièvement ce que signifie une architecture durable. Ses mécanismes d'apparition et la mise en place de solutions trouvent leur origine bien avant nos problèmes climatiques actuels. Apprendre de notre passé pour construire notre avenir est ce qui rend l'humain si intelligent. Un retour de certaines valeurs anciennes et perdues semble aujourd'hui nécessaire, mais c'est surtout un renouement avec les forces de la nature qui semble indispensable.

C'est ainsi que l'architecture des micro-climat, le bioclimatisme, prend forme. Ses principes et fonctionnement diffère bien de la pratique architecturale moderne exercée depuis la révolution industrielle. Le dessin de l'espace contenu par des formes géométriques laisse sa place au dessin de l'espace par des mouvements d'air et des gradients de températures. Ces phénomènes s'organisent en stratégies par saison, cherchant à créer un climat agréable dans les espaces intérieur. Des notions de physique indispensables seront brièvement expliquées, afin de mieux comprendre les stratégies bioclimatiques passives qui peuvent être mises en place par temps chaud, pour dissiper la chaleur et rafraîchir les espaces. Ces techniques connues depuis parfois des siècles, peuvent être remises au goût du jour afin de trouver leur place dans notre habitat contemporain.

Présenter des solutions architecturales aux effets bénéfiques pour le confort ne se limite pas qu'à cela. De nombreuses questions concernant leur efficacité, leurs bénéfices ou leur coût surviennent. Mais chaque intervention est indissociable d'une dimension humaine et sociale, puisqu'elle modifie l'habitat de ses occupants. C'est au travers de l'analyse d'exemples construits ou fictifs que la découverte de perspectives allant au-delà de la simple fonction physique est rendue possible. Le caractère social joue un rôle important dans l'architecture, y compris dans la construction bioclimatique. Les cas d'études laissent entrevoir un usage alternatif d'espaces que l'on pouvait considérer comme acquis.

L'ambition de cet écrit est de stimuler l'architecte ou l'urbaniste à être curieux et intéressé par ce qui l'entoure. La lutte contre le réchauffement climatique a mis du temps avant d'éveiller un intérêt auprès de la discipline. Les architectes, en un premier temps, subissaient plus que utilisaient les nouvelles directives et obligations environnementales et thermiques élaborées par les ingénieurs, associations et dirigeants politiques. Mais subir ces directives n'a pas lieu d'être, si l'on comprend les mécanismes et solutions qui s'offrent à nous pour y répondre à cet avenir incertain.

Dans l'espoir de vous ouvrir les yeux sur un monde plein de possibilités et d'opportunités, où le bioclimatisme peut rimer avec socialisme thermique, je vous souhaite une bonne lecture.

ARCHITECTURE DURABLE



ARCHITECTURE DURABLE

LA TERRE FINIE

« Nous avons fait tout ce chemin pour explorer la Lune, mais le plus important, c'est que nous avons découvert la Terre^[1] », déclare l'astronaute William Anders, 50 ans après sa mission Apollo 8.

la Terre

En 1968 est publié par la NASA un des premiers clichés de la Terre pris depuis l'espace : *Lever de Terre*. Cette photographie est prise par William Anders le 24 décembre 1968, durant la mission Apollo 8 vers la Lune. On y voit pour une des première fois à l'époque, la Terre, cachée en partie dans son ombre, avec au premier plan la surface lunaire, à la manière d'un lever de soleil. Ce cliché extraordinaire ne symbolise pas seulement l'exploit technique et technologique incroyable réalisé par les américains à cette date là, il devient par la même occasion le symbole de la finitude de la planète bleue. Sa publication par la NASA suscite au sein de l'opinion publique une certaine prise de conscience : la Terre est la chose la plus importante que nous partageons en tant qu'espèce et c'est la seule que nous avons.

fig. 52 : *Lever de Terre*

The Limits To Growth

La publication en 1970 d'un rapport du Club de Rome, *The Limits To Growth*, transforme l'idée de ce cliché en un constat scientifique. Il pourrait être l'une des premières raisons expliquant l'apparition d'une architecture durable telle que nous la connaissons aujourd'hui. Ce rapport indique le nombre d'années restant avant l'épuisement des ressources, principalement métaux et énergies fossiles, suite à leur exploitation. Une partie des affirma-

tions s'est avérée fautive, puisqu'ils affirmaient l'épuisement du charbon en 2083, celle du pétrole en 1992, et celle du gaz naturel après 1994^[2]. Mais le rapport mentionne également les conséquences qu'auront une consommation sans limite d'énergie pour les années à venir : le réchauffement climatique et l'augmentation de la température en ville.

le choc pétrolier

Les événements d'octobre 1973 pourraient en être une deuxième raison. À ce moment là, l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (Opep), comprenant, entre autres, l'Iran, l'Arabie Saoudite, le Venezuela et les Émirats arabes unis, décident d'augmenter le prix du baril de pétrole de 17% et les taxes sur les compagnies pétrolières étrangères de 70%. Les conséquences pour les pays occidentaux sont énormes. C'est ce qu'on appelle le choc pétrolier de 1970. Ces pays, fortement dépendant des imports de pétrole de ces pays, font passer à une crise énergétique sans précédent. La réponse des pays impactés est une production d'énergie plus locale, mais pas pour le moins écologique. La France se lance dans le nucléaire et l'Allemagne fait tourner des usines à charbon.

l'échec

Ni le choc pétrolier, ni les affirmations du Club de Rome, ont ouverts les yeux des gouvernements sur leur dépendance massive à l'énergie et sur l'échec de l'humanité à construire un avenir sain. L'opportunité d'un changement de mode de consommation semble avoir été manquée, mais pas pour tout le monde. Rares sont les consciences qui ne font pas qu'entendre les faits et qui agissent. Quelques architectes cherchent alors une forme d'architecture, qui répond aux notions d'écologie et d'économie.

[2] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020.

ARCHITECTURE DURABLE

RÉINVENTER L'EXISTANT

« Manifestement, si nous voulons survivre, nous devons quitter la route que nous avons empruntée depuis la Révolution Industrielle. Par ailleurs, retourner à l'état primitif ne paraît guère attrayant. C'est pourquoi nous devons organiser nos échanges avec notre biosphère terrestre sur la base de nouveaux critères de responsabilité et d'un nouveau code d'éthique énergétique^[3] » (David Wright).

La durabilité, selon la Commission mondiale de l'environnement et du développement, est un développement qui répond au besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins^[4]. L'architecture durable est par conséquent, une forme d'architecture, dont sa conception et réalisation visent à créer des environnements de vie sain, en minimisant les impacts environnementaux négatifs, la consommation d'énergie et l'utilisation des ressources humaines.

le vernaculaire

Suite aux événements des années 1970, de nombreuses formes architecturales diverses et variées émergent dans les pays industrialisés. Mais ce sont les recherches de Victor Olgay, professeur à la Princeton University, qui marquent le début d'une recherche de forme d'architecture durable encore d'actualité aujourd'hui. Comme l'indique Philippe Rahm dans *Histoire naturelle de l'architecture*, il « cartographie les relations naturelles entre architecture et climat, en étudiant l'adaptation des formes architecturales et du choix des matériaux principalement aux effets du soleil et du vent^[5] ». Ainsi, Olgay est dans les années 1970, à l'origine d'une quête de modèles d'architecture et d'urbanisme issus de l'architecture vernaculaire, qui touche

[3] D. Wright, « Manuel d'architecture naturelle », Parenthèses, Marseille, 2018, p.17.

[4] la notion écologique du terme durabilité provient du rapport de Brundtland, établi en 1987 .

[5] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.265



toute la discipline et ce encore aujourd’hui.

En réalité, toute forme d’architecture vernaculaire peut être définie comme durable. Les maisons traditionnelles islandaises couvertes d’herbe tirent profit de l’isolation et du stockage thermique de la terre ainsi que de l’évaporation de la couche végétale pour toujours conserver des températures intérieures agréables. L’entrée creusée tel un tunnel dans le sol d’un igloo permet de ne jamais laisser s’échapper d’air chaud vers l’extérieur, permettant de très grandes différences de température entre l’intérieur et l’extérieur. Les tours de vent au moyen-orient tirent profit des vents dominants en hauteur et de l’effet de cheminée pour créer des courants d’air rafraîchissants. Tous ces exemples forment une protection contre le climat, permettant à l’homme d’y vivre. Ils répondent aux modes de vie et aux besoins de ses occupants, tout en utilisant des matériaux et ressources locales. L’architecture vernaculaire a « la capacité d’englober le changement, d’absorber le passage du temps sans perdre l’idée architecturale sur laquelle elle repose, a su rendre ses formes intelligibles, son langage accessible à tous. Ces qualités et la variété des formes qui lui sont propres en font une source stimulante de réflexion architecturale »^[6].

Peut-être que ce que nous appelons aujourd’hui architecture bioclimatique se verra un jour trié dans un livre au même rang que l’architecture vernaculaire. Mais d’ici là, de nombreux changements sont encore à prévoir.

fig. 53 : maison traditionnelle islandaise

Définir la forme que doit prendre l’architecture pour être durable tout en répondant aux besoins humains, sociaux et climatiques à venir n’est pas une mince affaire, et ne peut pas être déterminée par une simple personne, encore moins un étudiant. Il s’agit plutôt d’indiquer une direction alternative aux pratiques habituelles d’aujourd’hui, qui va dans le bon sens. Nous l’avons vus, le réchauffement climatique nous oblige à faire un usage prudent des ressources qui nous restent, à préserver la diversité biologique et culturelle, afin de nous permettre de vivre dans un monde meilleur. Bien que le sujet de ce chapitre porte sur les solutions de ventilation et de rafraîchissement passifs, c’est tout le secteur de la construction qui doit se réinventer. Ce changement ne peut pas s’opérer en modifiant quelques lois et directives. C’est plutôt un état d’esprit, qui doit germer au sein de la profession afin que toutes les mesures qui puissent être prises soient concrétisées. Car comme l’indique le collectif countdown 2030 : « se contenter de demi-mesures ne suffira pas^[7] ».

[6] Paola Tosolini, « Contaminations linguistiques. Le langage vernaculaire dans la pratique architecturale moderne », EPFL, thèse 4373, 2009.

[7] voir V. Felber, « Se contenter de demi-mesures ne suffira pas », Espazium [en ligne], 2021. [consulté le janv. 10, 2022].

ARCHITECTURE DURABLE

À LA RECHERCHE DE SIMPLICITÉ

Voir la planète bleue dans son entier, perdue dans un vide au noir profond, marque la finitude de notre planète, mais aussi de ses ressources. « Pour moi, cela souligne notre responsabilité de cohabiter plus fraternellement les uns avec les autres, et de préserver et chérir le point bleu pâle, la seule maison que nous n’ayons jamais connue.^[8] », récite l’astronome Carl Sagan en 1994. Pour cela, notre régime de croissance économique et démographique ne peut pas conserver sa courbe empruntée jusque là. Un changement doit s’opérer. À son échelle, l’architecture cherche une réponse à ce changement. Elle doit offrir plus, en utilisant moins.

L’approche de l’architecture doit se faire dorénavant de manière économique. Pas seulement sur la consommation d’énergie, mais sur tous ses aspects. Frugalité^[9] en énergie, frugalité en matière, frugalité en technicité, frugalité pour le territoire, voilà les domaines identifiés par Alain Bornarel, Dominique Gauzin-Müller et Philippe Madec dans leur « manifeste pour une frugalité heureuse ».

la frugalité pour le territoire

La question de l’architecture durable commence à l’échelle du territoire. L’enseignement que nous apporte l’étude de l’architecture vernaculaire, par exemple, est sa réponse aux contraintes physiques d’un lieu, que ce soit par la nature du terrain, son accès aux ressources ou bien le climat dans lequel il se trouve. La récente période que l’on pourrait nommer *technologique*, a fait

[8] Carl Sagan, « Pale Blue Dot », 1994; dans @NatGeoFrance, « Le “Lever de Terre” de 1968 a bouleversé notre vision du monde (et du cosmos) », National Geographic [en ligne], 22 décembre 2018. [consulté le janv. 12, 2022].

[9] défini la sobriété ou simplicité de quelque chose

abstraction de son environnement, avec les conséquences que l'on connaît. Le respect de son contexte, de l'air, des sols, des eaux, de la biodiversité, forment une nouvelle valeur foncière locale^[10]. Le choix des programmes et les choix constructifs doivent se faire dans la mesure qu'ils allègent leur empreinte écologique, et apporte une plus value durable à un site.

La frugalité en matière recherche les mêmes objectifs. Employer moins en faisant mieux. L'usage de techniques traditionnelles revient en force. Celle-ci s'accompagne de l'emploi de matériaux oubliés. Au point, ou certaines réglementations ne les prennent plus en compte. Les matériaux organiques ou bio-sourcés font leur grand retour. L'alternative au béton, pourtant très prisé en Suisse, est recherchée dans de nombreux projets, et avec raison. L'industrie du ciment représente à elle seule 8% des émissions globales de CO₂ dans le monde, portant un voile noir sur le secteur du bâtiment. Un Suisse consomme 584kg de ciment par an^[11], ce qui est deux fois plus élevé qu'en France, aux États-Unis ou bien au Brésil.

la frugalité en matière

Mais les matériaux de construction et leurs rejets de CO₂ associés ne sont que la partie visible de l'iceberg. Car nous l'avons vu : les émissions de matériaux de construction représente en réalité qu'une faible partie des émissions engendrées par les bâtiments dans leur globalité. Dans l'Union Européenne, les bâtiments seuls, sans leur construction, représentaient en 2019 près de 40% de l'énergie finale consommée^[12]. Cette valeur est de 43.3% pour la Suisse^[13]. L'exploitation des bâtiments représente donc une consommation impressionnante de ressources énergétiques.

Une frugalité en énergie s'impose. Nos connaissances architecturales nous le permette. L'architecture vernaculaire a laissé suffisamment de traces pour que nous puissions en apprendre. Les méthodes de ventilation naturelle, rafraîchissement passif, les gains solaires, l'inertie thermique, tous les principes que l'on retrouve dans l'architecture bioclimatique, existent déjà. Elles permettent de réduire la consommation d'énergie au minimum, voire de s'en passer complètement, tout en assurant un confort des espaces intérieurs. Ce qu'il faut, c'est d'avoir la volonté de les employer et de lui trouver les formes d'expression adéquate.

la frugalité en énergie

En fin de compte, ce que l'architecture bioclimatique cherche à faire, c'est d'offrir plus avec moins de moyens. L'économie d'énergie, de matières, d'entretien et de maintenance, c'est un retour aux fondamentaux. L'homme sait se passer de systèmes de ventilation, d'humidification, de climatisation

la frugalité en technologie

[10] A. Bornarel, D. Gauzin-Müller, et P. Madec, « Manifeste pour une frugalité heureuse », janv. 19, 2018.

[11] L. Jorio, « Comment le ciment prépare sa révolution écologique », SWI swissinfo.ch, mars 10, 2021. [consulté le janv. 11, 2022].

[12] voir fig. 5, répartition de la consommation finale d'énergie par secteur dans l'UE.

[13] voir fig. 8, répartition de la consommation finale d'énergie par secteur en Suisse.

etc. Ces installations représentent un entretien important, tout comme leur coût y étant associé. L'approche *low tech* ne signifie pas une absence de technologies. Cela signifie plutôt « [...] le recours en priorité à des techniques pertinentes, adaptées, non polluantes ni gaspilleuses, comme à des appareils faciles à réparer, à recycler et à réemployer^[14] », nous explique le manifeste pour une frugalité heureuse.

Ce que l'architecture durable recherche, c'est une simplicité. Ce n'est pas l'installation davantage de systèmes techniques complexes qui vont nous aider à l'avenir, puisque ce sont en partie ceux-ci qui nous ont placé devant ces défis climatiques. Mais cette quête de simplicité, que Ludwig Mies van der Rohe appellerait « less is more », n'est en réalité qu'apparente. Les phénomènes climatiques qui se cachent derrière la conception de micro-climats sont complexes. Leur compréhension demande des notions de physique du bâtiment allant au delà du simple dimensionnement d'une couche d'isolation. Mais elle demande avant tout un ressenti, un *feeling*, juste et sensible, face aux forces de la nature.

[14] A. Bornarel, D. Gauzin-Müller, et P. Madec, « Manifeste pour une frugalité heureuse », 19 janvier 2018.

CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

LES ESPACES COMME MICRO-CLIMATS

Nous passons 90% de notre temps dans des espaces fermés. Maintenir un climat intérieur sain est indispensable. Pour permettre le confort de ses occupants, l'architecture bioclimatique se dote de stratégies thermiques, afin de chauffer et rafraîchir ses espaces par la simple utilisation de ressources disponibles sur place. Pour ça, elle tire le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle de l'air. Un projet doit donc être en adéquation entre la construction, le comportement de ses usagers et le climat extérieur.

« L'objet de l'architecture est l'espace^[15] », décrit Philippe Rahm. C'est une part de l'atmosphère que l'on vient cloisonner entre quatre murs, un sol et un plafond, sur laquelle on cherche un contrôle absolu. Ce volume confiné se décrit par des caractéristiques physiques, c'est à dire la température, l'hygrométrie, le mouvement de l'air, la nature des gaz, etc., ou bien par des conditions lumineuses, tel que la part du spectre du rayonnement solaire qu'on laisse s'introduire ou son intensité. Tout cela, dans le but de faire vivre l'homme dans un environnement lui étant, en soit, hostile. L'architecte devient ainsi, parfois sans s'en rendre compte, le créateur d'un micro-climat intérieur.

La conception bioclimatique est au final la conception d'espaces selon des principes météorologiques. On y pense en terme de flux d'air, de surface de captage, de volume de stockage, de gradient thermique et autres, plutôt qu'à des principes strictement géométriques. Tirer profit des phénomènes climatiques pour rendre un lieu habitable, tout en diminuant la consommation d'énergie, c'est ça le caractère durable de l'architecture bioclimatique.

[15] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.279.



CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

LA THERMODYNAMIQUE DES FLUIDES COMME OUTIL ARCHITECTURAL

Les stratégies de contrôle du micro-climat généré dans un bâtiment fait notamment appel à trois principes physiques de la thermodynamique qu'il faut savoir maîtriser. Ce sont eux qui permettent le transfert d'énergie sous forme d'échanges thermiques entre des objets ou milieux : la conduction, la convection et le rayonnement.

Pour qu'un échange thermique se produise, il faut qu'un corps soit plus chaud que l'autre. Ils forment ainsi un gradient thermique. D'après le second principe de la thermodynamique, la chaleur se dirige toujours vers le corps le plus froid.

- | | |
|----------------|--|
| la conduction | La conduction permet le transfert de chaleur par contact direct entre deux corps. C'est ce qui se passe quand on touche avec la main la surface d'un radiateur. La conduction dépend de la conductivité thermique d'un matériau, qui décrit sa capacité à conduire et donc de transmettre de la chaleur. |
| la convection | La convection est en générale la forme dominante de transfert de chaleur en milieu liquide et gazeux. C'est grâce au mouvement de l'air, que l'énergie calorifique se déplace du radiateur jusqu'à nous. Ce terme désigne l'effet combiné de conduction et du mouvement d'un fluide qui sert de milieu propagateur à la chaleur. |
| le rayonnement | Le rayonnement ne nécessite aucun milieu propagateur. L'énergie radiante se déplace sous la forme d'ondes électromagnétiques, qui se propagent en ligne droite à travers l'espace et les fluides, jusqu'à ce qu'elles soient absorbées par un solide ou réfléchies par une surface réfléchive. C'est ce que l'on ressent quand on tend la main devant le radiateur sans le toucher. La plupart du temps, ces trois modes d'échange thermique ont lieu simultanément. Ils sont d'une grande importance dans tout projet d'architecture, car ils définissent les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment et par conséquent, sont en parti responsable du confort de ses occupants. Une fois ces principes bien assimilés, ils peuvent devenir des outils essentiels dans la conception de bâtiments bioclimatiques. |



CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

DES STRATÉGIES COMME MODE DE VIE

La conception bioclimatique consiste ni plus ni moins dans la création d'une enveloppe dynamique. Cette enveloppe a pour rôle d'absorber les variations climatiques extérieures et d'en transmettre seulement ce qui est nécessaire vers l'intérieur, afin d'y générer un climat confortable.

Tout projet architectural doit faire face en premier lieu à des conditions cadre. Parmi celles-ci se trouvent le site sur lequel construire, le climat, le contexte bâti ou naturel qui se trouve autour et le programme. En tant qu'architectes, nous avons que peu, voire aucune influence sur ces caractéristiques. Mais nous pouvons choisir l'orientation de l'édifice et l'aménagement des alentours. Cependant, là où l'architecte a une réelle influence, est sur les caractéristiques du bâtiment en soit. Il peut décider de la forme qu'il doit avoir, le type et la taille des ouvertures, l'épaisseur à donner aux couches thermiques, l'introduction de masse thermique, de protections solaires et de dispositifs de ventilation ou de rafraîchissement naturel. Ces éléments là deviennent les outils de l'architecte, pour que le bâtiment accepte ou rejette, qu'il stocke ou relâche les énergies naturelles au moment approprié. Ils deviennent aussi un outil d'exploration de nouveaux modes de vie et d'habiter.

Les stratégies de contrôle du climat se portent principalement sur deux saisons, l'hiver et l'été. Chaque choix de conception pour une saison, engendrera forcément des conséquences sur la saison opposée. C'est pour cela qu'il est toujours important de conserver une vue d'ensemble sur le projet. Chaque stratégie cible tous les modes de transfert de chaleur, afin de limiter ou de favoriser la conduction, la convection ou le rayonnement. Cela peut rendre la compréhension de certains phénomènes complexe, mais les possibilités de combinaisons presque infinies.

En hiver, on cherchera à créer un climat intérieur plus chaud que celui à l'extérieur. Pour cela, la conception d'un bâtiment vise à minimiser les pertes au travers de l'enveloppe d'un bâtiment, tout en favorisant les gains thermiques. Ainsi, on cherchera à capter la chaleur provenant du soleil ou de la terre, la stocker dans la masse thermique^[16] du bâtiment, la distribuer au travers des espaces selon les besoins, et de conserver la chaleur à l'intérieur de l'enveloppe grâce à une bonne isolation.

la stratégie hivernale

En été, la stratégie climatique s'inverse, pour privilégier une température fraîche à l'intérieur d'un bâtiment. Ainsi, il est préférable de protéger les espaces intérieurs des gains solaires, de minimiser les sources de gains internes, de dissiper les surchauffes et rafraîchir les locaux de manière passive.

la stratégie estivale

L'utilisation de l'énergie solaire dans l'architecture n'a en réalité rien de nouveau, bien que David Wright^[17] considérerait notre temps comme l'âge solaire. Le combat de l'architecture bioclimatique depuis le début de son existence était principalement de se tenir au chaud sans avoir recours à des sources d'énergie externes polluantes. Celui-ci trouve encore sa place aujourd'hui et les connaissances s'y rapportant sont largement acquises par le plupart des concepteurs. Mais nous l'avons vu avec le changement climatique, le combat va devoir évoluer. L'augmentation drastique des besoins de fraîcheur ces dernières années en est un premier indicateur.

un penchant pour le frais

C'est cette gestion du climat intérieur en été que nous allons approfondir par la suite, plus particulièrement les stratégies de dissipation de la chaleur ainsi que les possibilités de rafraîchissement de l'air par des moyens passifs.

Le premier point de la stratégie estivale est la protection face aux gains thermiques. Cette condition est relativement facile à atteindre puisque l'enveloppe thermique qui permet de limiter les pertes thermiques en hiver au travers de son isolation, permet également d'éviter l'introduction des températures élevées extérieures en été. L'orientation du bâtiment par rapport au soleil est également un facteur déterminant concernant les gains thermiques par énergie solaire. La plupart des faces d'un édifice y sont fortement exposées en été. Mais ce sont les ouvertures qui représentent le plus grand risque de surchauffe et qui nécessitent une attention particulière. Les gains solaires traversant une fenêtre créent un effet de serre non-négligeable à l'intérieur même du bâtiment. Bon nombre de protections solaires, fixes ou mobiles, existent sur le marché. Il n'est pas inutile de rappeler qu'une protection solaire efficace se place à l'extérieur de l'enveloppe thermique, et que le soleil apporte une énergie considérable même en étant bas à l'horizon. Des protections verticales et horizontales doivent donc être disposées

protéger

[16] voir thème « stockage thermique »

[17] architecte américain très intéressant, se préoccupant depuis les années soixante de la prise en compte des paramètres climatiques et des économies d'énergie dans la conception architecturale.

aux emplacements adéquats. Mais avant même de considérer l'installation d'un dispositif de protection solaire, le contexte avec ses bâtiments, son relief ou la végétation, peuvent offrir un écran naturel efficace. En plus de protéger le bâtiment, les éléments végétaux peuvent constituer de véritables réservoirs d'air frais pour le refroidissement ultérieur du bâtiment.

minimiser

Minimiser les charges internes est le deuxième axe de la stratégie. Les personnes, les équipements et appareils électrique, ainsi que l'éclairage artificiel sont sources de chaleur à l'intérieur même du bâtiment. Le corps humain adulte au repos émet en permanence l'équivalent d'une ampoule électrique de 100W^[18]. Cela peut sembler peu mais représente dans un bâtiment bien isolé source de chaleur notable. Bien que l'efficacité énergétique des équipements ait beaucoup progressé ces dernières années et que le nombre d'occupants, ainsi que leur activité métabolique, soit difficile à prédire, l'architecte n'a que peu d'influence sur ces paramètres. Il peut cependant influencer sur la nécessité de la lumière artificielle, si la lumière naturelle ne s'avérait pas suffisante. Cependant, allier éclairage naturel et fraîcheur intérieure en été semble rester un défi majeur pour les architectes aujourd'hui.

dissiper

Lorsque subsiste une surchauffe malgré la mise en pratique des deux premières mesures, il faut dissiper l'excès de chaleur interne du bâtiment. Ceci peut être effectué par la ventilation naturelle par effet de cheminée ou par le vent (ventilation transversale). Afin d'optimiser la ventilation transversale, le concepteur devra profiter de la différence de pression opérant sur les façades au vent ou sous le vent, ainsi que de l'aménagement du contexte pouvant canaliser les flux d'air. En absence de vent, la ventilation par effet de cheminée constitue une importante stratégie de dissipation de la chaleur, utilisant le même principe qu'une cheminée pour feu de bois. Dans les deux cas, le plan des espaces à ventiler devra être réfléchi de sorte à ce que les courants d'air puissent les traverser sans encombre.

rafraîchir

Parfois, le simple remplacement de l'air vicié n'est pas suffisant, car celui-ci reste trop chaud. Une ventilation nocturne permet en outre d'évacuer la chaleur emmagasinée de jour dans les masses thermiques exposées du bâtiment. Le rafraîchissement de l'air peut également se faire au travers de l'évaporation d'eau à partir de plans d'eau, de fontaines, de brumisateurs ou de la végétation. L'échange thermique avec le sol doit également être considéré comme une solution très efficace.

Dissiper et rafraîchir seront les deux thèmes abordés dans la suite de ce chapitre. Ils constituent une part intégrante de la stratégie bioclimatique encore peu employée dans nos latitudes. Bien que ces principes ne soient

[18] L. Jorio, « Quand le corps humain devient une centrale électrique », SWI swissinfo.ch, avr. 24, 2021. [consulté le janv. 10, 2022].

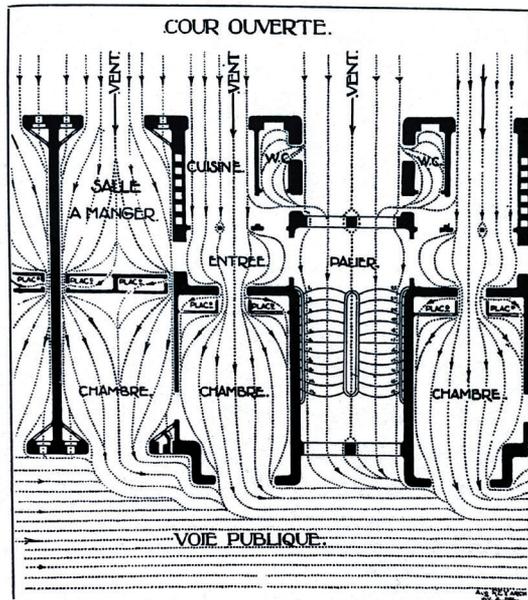
pas nouveaux, les réinventer pour les intégrer dans notre langage architectural moderne semble nécessaire. Leurs principes sont simples, efficaces et appréhensibles par tous.

Il ne s'agit pas seulement pour un concepteur de tels dispositifs de comprendre leur fonctionnement. Inclure les occupants dans l'utilisation active de ces dispositifs semble être le réel défi. Un bâtiment ne peut être efficace énergétiquement que si ses occupants sont conscients de son fonctionnement. La ventilation entièrement automatisée ne nécessitant aucune manipulation, similaire à poser ses bagages à l'hôtel, n'est aujourd'hui plus recevable. Cela ne correspond plus non plus au niveau de confort souhaité. Chaque individu étant différent, un climat défini à l'avance dans un bureau d'ingénieur ne pourra pas satisfaire tout le monde. Les occupants doivent faire partie intégrante de ce qui forme son habitat.

Il n'y a aucun doute sur le fait que l'application de ces solutions sera nécessaire à l'avenir, afin de répondre aux conséquences du réchauffement climatique. Appréhender, comprendre et intégrer ces méthodes aujourd'hui, c'est assurer la construction d'édifice qui répondront aux besoins de demain.

l'occupant acteur de son propre bien-être

DISSIPER



DISSIPER

POURQUOI UNE VENTILATION NATURELLE?

« Pour guérir, il n’y a que trois solutions : se déplacer vers un lieu où l’air sent meilleur ou le parfumer pour en couvrir la mauvaise odeur, ou bien chasser l’air en le ventilant^[19]», nous recommande le philosophe Robert Burton au milieu du 17^{ème} siècle. Nous garderons dans notre cas plutôt la dernière des solutions.

fig. 54 : schéma de ventilation d’une habitation par Augustin Rey, architecte.

Le renouvellement d’air est nécessaire dans les constructions pour de nombreuses raisons.

Le remplacement de l’air vicié par de l’air frais est nécessaire été comme hiver pour la bonne respiration des occupants, ainsi que pour l’évacuation des polluants internes. Évacuer la chaleur issue de sources internes et solaires provoquant une hausse de la température. Améliorer l’échange de chaleur entre les personnes et l’air en augmentant sa vitesse et donc l’évaporation cutanée^[20]. Évacuer pendant la nuit la chaleur accumulée en journée par la masse thermique du bâtiment^[21].

Toute ventilation naturelle est générée par une différence de pression. Celle-ci peut être générée par la pression du vent^[22] ou une différence de densité (température) entre l’air chaud ou et l’air froid^[23]. Les propriétés de ces mouvements d’air sont décrites par la mécanique des fluides.

Quelle que soit la source du mouvement d’air, la ventilation est ce qui lie la quasi totalité des méthodes de gestion thermique entre eux. C’est elle qui transporte la chaleur d’un endroit à un autre. Elle est un outil essentiel de l’architecte pour la conception des espaces et du confort thermique des occupants, et ce, sans consommation d’énergie.

source :

dans « Congrès international de la tuberculose », Paris, 2-7 octobre 1905, emprunté à P. Rahm, « Histoire naturelle de l’architecture », Paris, 2020.

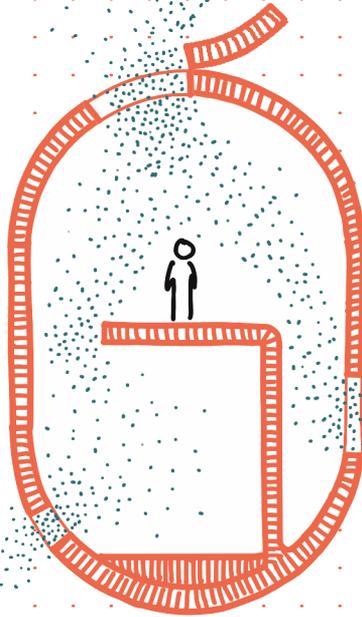
[19] P. Rahm, « Histoire naturelle de l’architecture », Paris, 2020, p.128.

[20] voir thème « rafraîchissement adiabatique »

[21] voir thème « rafraîchissement nocturne par convection »

[22] voir thème « ventilation par le vent »

[23] voir thème « ventilation par effet de cheminée »



En savoir plus :

Attention : si la température intérieure est plus basse que la température extérieure, par exemple avant qu'un bâtiment ne chauffe en été, on observe l'effet de cheminée inverse. L'air frais entre par les étages supérieurs et sort par le rez-de-chaussée. Dans certains cas il faudra prévoir un mécanisme pour empêcher ce retour.

source : « Physique du bâtiment I & II », EPFL, cours du Prof. J.-L. Scartezzini, Lausanne, 1991.



En été, la ventilation par effet de cheminée permet de ventiler efficacement les espaces intérieurs et ce, même sans vent, car elle joue sur des gradients de température.

En hiver, cette forme de ventilation fonctionne également. Elle permet ainsi un renouvellement de l'air de manière naturelle toute l'année. Elle permet aussi de garder un contrôle sur la ventilation même avec plusieurs ouvertures



La ventilation par effet de cheminée est une ventilation naturelle et par conséquent, ne consomme aucune énergie, à moins qu'elle soit combinée à un ventilateur qui s'allume occasionnellement.

Elle permet un renouvellement de l'air continue dès lors que la température extérieure est plus chaude que celle à l'intérieur, qui évacue l'air chaud et pollué.

DISSIPER

VENTILATION PAR EFFET DE CHEMINÉE

En savoir plus :

L'efficacité de la ventilation par effet de cheminée est directement proportionnel à la surface des ouvrants et à la racine carrée de la différence de hauteur : un doublement de la hauteur n'améliore l'efficacité que de 40%.

source : J.-L. Dadoux et al., « Architecture climatique équilibrée », PACER, Office fédéral des questions conjoncturelles, Lausanne, 1996

stratégies estivale et hivernale

bienfaits pour la planète et l'habitant

« L'effet de cheminée [...] se manifeste chaque fois qu'une colonne de fluide est entourée d'un fluide de densité différente^[24] ». Ici, la colonne de fluide sera notre bâtiment, dont l'air intérieur est plus chaud ou plus froid que l'air extérieur.

Pour que ce principe puisse être utilisé comme mécanisme de ventilation, un bâtiment nécessite des différences de hauteur des ouvertures pour permettre le passage de l'air. Quand l'air chauffe, il monte, car pour une même masse, il occupe un volume d'air plus important. Sa densité est donc plus faible que celle de l'air froid. En montant, il crée une dépression dans les zones basses et une surpression dans les zones hautes^[25]. C'est ce phénomène qui est à l'origine du mouvement d'aspiration par dépression, en évacuant l'air vicié en toiture pendant que l'air frais s'introduit depuis l'extérieur en partie basse par pression naturelle^[26]. On appelle ce phénomène en anglais le *stack effect* ou *natural buoyancy*.

La différence de pression entre le haut et le bas de la colonne s'annule sur la ligne neutre. Elle se situe en général à mi-hauteur entre les ouvrants bas et hauts^[27]. Y placer une ouverture ne créerait donc pas de mouvement d'air.

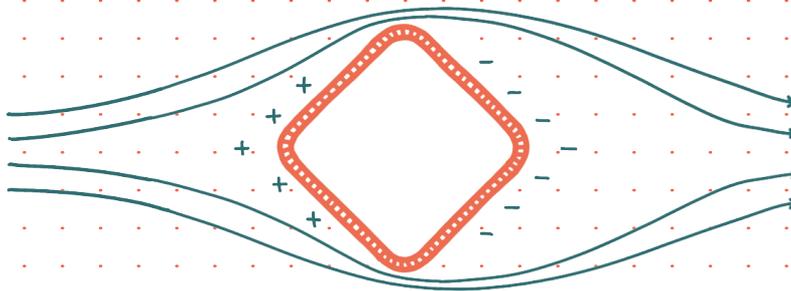
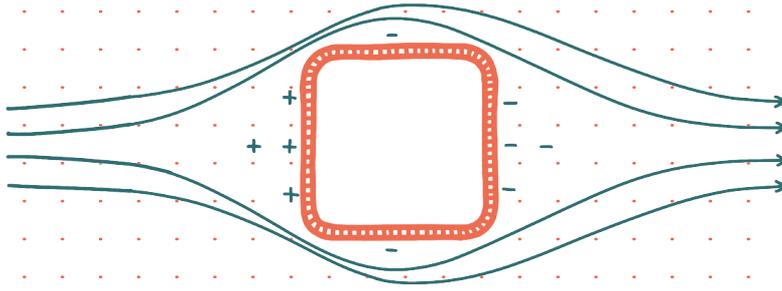
Ce procédé est particulièrement intéressant pour les stratégies de ventilation en été, puisque l'efficacité de la cheminée augmente avec une différence de pression et donc de température plus importante. Il permet d'évacuer efficacement l'air ambiant trop chaud par le haut, à condition que l'agencement spatial du bâtiment le permette. On peut même accentuer artificiellement ce procédé en créant des cheminées solaires.

[24] « Physique du bâtiment I & II », EPFL, cours du Prof. J.-L. Scartezzeni, Lausanne, 1991.

[25] J.-L. Dadoux, D. Chuard, J.-P. Eggimann, et C. Scaler, « Architecture climatique équilibrée », PACER, Office fédéral des questions conjoncturelles, Lausanne, 1996, p.106.

[26] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020.

[27] C. Karmann, « Confort & Energie », présenté à cours UEK-AR440, Lausanne, 2020.



En été, la ventilation par le vent est un moyen efficace de dissiper la chaleur et créer une ventilation dite de confort, qui accentue l'évaporation de l'eau sur la surface de la peau.

En hiver, la ventilation par le vent peut également être utilisée pour renouveler l'air vicié intérieur. Mais les ouvrants devront être équipés ou dimensionnés de sorte à ce que le débit puisse être régulé, afin de limiter les déperditions thermiques.



La ventilation par le vent est par définition une ventilation naturelle et ne consomme donc pas d'énergie, sauf celle de la matière grise de son concepteur.

Elle permet un rafraîchissement efficace et une meilleure qualité de l'air intérieur, pour un coût très faible, puisqu'elle ne nécessite pas d'équipement de ventilation.

DISSIPER

VENTILATION PAR LE VENT

L'écoulement de l'air autour des bâtiment crée des zones de surpression et de dépression qui ont pour effet de générer des forces et contraintes sur la structure d'un bâtiment, mais permettent avec une bonne conception de faire circuler l'air au travers de celui-ci.

La deuxième source de mouvement d'air dans un bâtiment est la ventilation par différence de pression, c'est à dire par le vent. Un bâtiment connaîtra une surpression sur sa face exposée au vent, tandis que sa face opposée connaîtra une dépression. Ainsi, le vent pousse l'air contre les ouvertures de la façade au vent et aspire au contraire à travers la façade sous le vent. Cette méthode est en général plus efficace que l'effet de cheminée, et permet d'utiliser des ouvrants moins grands. Cependant, il est parfois préférable de dimensionner les ouvertures sans tenir compte du vent, les périodes de calme en été étant souvent importantes.

stratégies estivale et hivernale

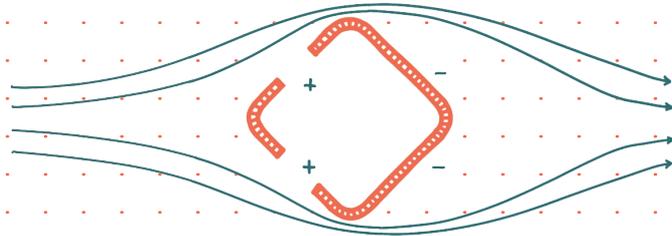
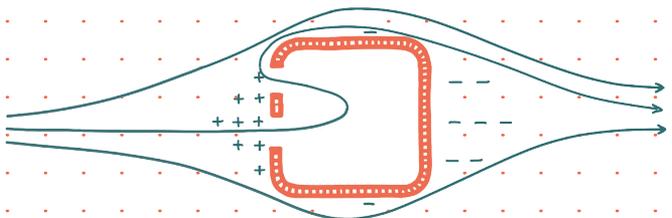
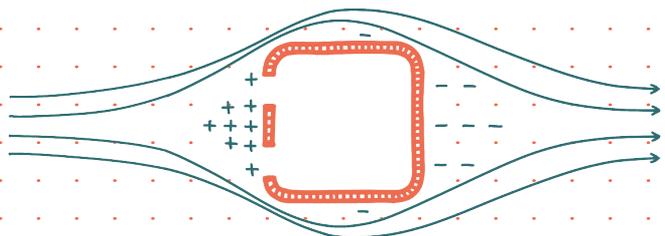
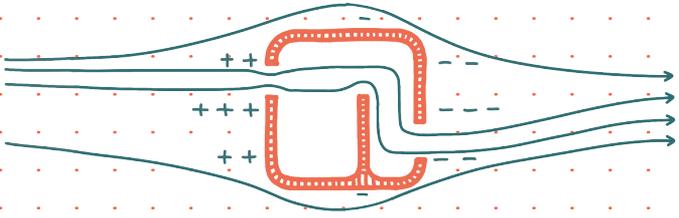
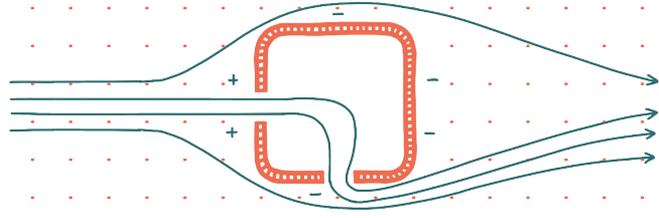
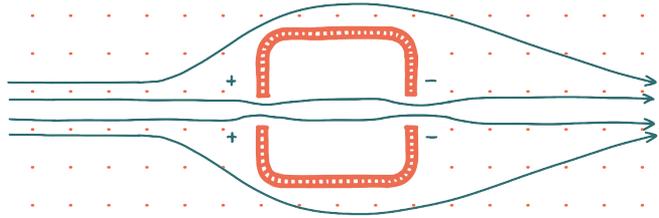
Dans ce cas aussi, le dimensionnement, l'emplacement et le type d'ouvertures sont des facteurs très importants. Ils déterminent notamment la vitesse du courant d'air. Mais une ventilation efficace dépend aussi d'autres paramètres.

bienfaits pour la planète et l'habitant

Une ventilation transversale, c'est à dire avec deux ouvertures opposées l'une de l'autre, est deux fois plus efficace qu'une ventilation avec des ouvertures sur une seule face^[28]. On dit pour cela en général que la largeur de la pièce doit être au maximum 5 fois sa hauteur^[29]. À l'échelle d'un bâtiment, cela nécessite également une adaptation du plan qui permette à l'air de circuler librement. Un plan libre ou bien un cloisonnement adapté au

[28] J.-L. Dadoux, D. Chuard, J.-P. Eggimann, et C. Scaler, « Architecture climatique équilibrée », PACER, Office fédéral des questions conjoncturelles, Lausanne, 1996.

[29] D. Licina, « IAQ and ventilation #2 », présenté au cours Building Energetics, EPFL, Lausanne, 2020.



mouvement de l'air sont donc nécessaires.

La ventilation avec des ouvrants sur une même face est aussi possible, bien que moins efficace. Pour cela, les ouvrants devront être placés de manière asymétrique. La pression au centre de la façade étant plus élevée que sur les bords^[30], une disposition symétrique aura pour effet d'annuler la différence de pression, laissant l'air stagner.

Le débit d'air pénétrant à travers une ouverture face au vent a une efficacité maximale lorsque la direction du vent ne s'éloigne pas de plus de 30° de la normale de la façade. La topographie extérieure, la végétation, le modèle de fenêtre ou des capteurs à vent peuvent servir à canaliser le flux d'air vers les ouvertures à partir de n'importe quelle direction.

L'efficacité est encore accrue en disposant des ouvertures plus grandes du côté sortie, sous le vent, que du côté entrée, au vent. La dissymétrie crée un effet d'aspiration maximale et permet un plus grand brassage d'air à travers les espaces. Même en absence de vent, la ventilation transversale fonctionne naturellement au travers de la différence de pression qui existe entre la façade à l'ombre en surpression et la façade ensoleillée, en dépression puisque plus chaude^[31].

En été, le courant d'air permet d'évacuer la chaleur d'un espace. Mais avec une vitesse plus élevée il peut aussi accroître la sensation de fraîcheur en favorisant l'évaporation cutanée. Ainsi, en augmentant la vitesse de 1 m/s, la température sèche (*dry bulb temperature*) s'abaisse de 3°C. La division de grands ouvrants en de plus petites unités permet une meilleure gestion des flux entrant et d'éviter une sensation d'inconfort.

Pendant les premières phases de conception avant de simuler les flux d'un projet, on peut utiliser des ordres de grandeur pour dimensionner les ouvertures. Pour assurer une bonne évacuation de la chaleur dans des conditions estivales, les ouvertures devraient représenter 5 à 10% de la surface de plancher d'un espace. Pour une sensation de fraîcheur par évapotranspiration comme décrit précédemment, les ouvertures devraient représenter 10 à 20% de la surface de plancher d'un espace^[32].

Vous l'aurez compris, la ventilation naturelle a de nombreuses possibilités à nous offrir. Pendant l'été, elle devient une arme redoutable contre les excès de chaleur. L'air conditionné et sa consommation d'énergie démesurée ne sont en réalité qu'une faible concurrence. Ce qu'il manque pour le faire voir à tout le monde, c'est d'en prouver son efficacité et ça, c'est à nous architectes de le faire.

[30] C. Karmann, « Confort & Energie », présenté à cours UEK-AR440, EPFL, Lausanne, 2020.

[31] D. Wright, « Manuel d'architecture naturelle », Parenthèses, Marseille, 2018.

[32] J.-L. Dadoux, D. Chuard, J.-P. Eggimann, et C. Scaler, « Architecture climatique équilibrée », PACER, Office fédéral des questions conjoncturelles, Lausanne, 1996.



Un espace avec de l'air frais se crée naturellement en zone basse. En été, il permet d'y supporter les heures les plus chaudes.

Un espace avec de l'air plus chaud se crée en zone haute. En hiver, il permet d'y passer les heures les plus froides.



Ce phénomène se crée de manière naturelle et peut donc être utilisé sans énergie.

La stratification thermique peut être intégrée dans l'architecture comme un mode de conception de l'espace et un mode de vie nouveau, qui répartit les activités selon un gradient de température.

DISSIPER

STRATIFICATION THERMIQUE

La stratification thermique est l'accumulation de couches d'air de températures différentes dans un volume donné : l'air chaud se trouve en haut et l'air froid en bas.^[33]

L'air chaud s'élève car pour une même masse, il occupe un volume d'air plus important que l'air froid.

En général la stratification thermique est perçue comme un phénomène négatif car il nécessite le chauffage de volumes d'air non utilisés, particulièrement dans des projets avec de hauts volumes. Mais avec une conception adéquate, la stratification de la chaleur peut être utilisée avec élégance et efficacité dans de nombreux projets passifs.

Dans la plupart des cas ce phénomène peut être utilisé afin de chauffer des espaces par ventilation. Mais plutôt que de se concentrer sur le haut de l'échelle, on peut s'intéresser au bas de celle-ci. Le gradient de température créé accumule certes de l'air chaud en haut, mais également de l'air plus froid en bas. En réalité, ceci n'a rien de nouveau. Les églises avec leurs grandes hauteurs profitent de ce principe : « l'air chaud, plus léger que l'air froid, monte dans la nef, préservant ainsi la fraîcheur là où se trouvent les visiteurs »^[34], nous explique Philippe Rahm. Souvent associé avec des matériaux à stockage thermique important, ce dispositif est d'une très grande efficacité pendant les été chauds, au point où le journal *La Voix du Nord* se permet de faire de la publicité pour les églises : « Envie de fraîcheur? Tous à l'église ou à la mer^[35] ... »

Alors, pourquoi pas transposer ce principe des églises à nos projets architecturaux modernes? Que ce soit à l'échelle d'un bâtiment ou d'un logement, tout est possible.

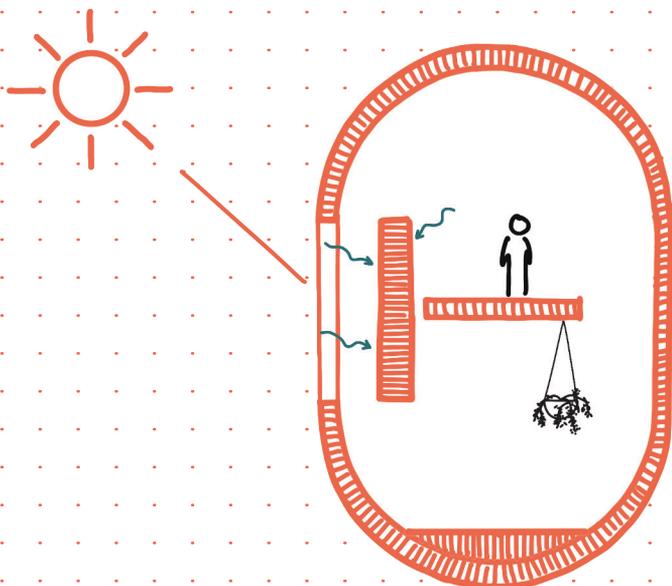
stratégies estivale et hivernale

bienfaits pour la planète et l'habitant

[33] voir « stratification » dans : D. Wright, « Manuel d'architecture naturelle », Parenthèses, Marseille, 2018.

[34] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.58.

[35] « Artois-Douaisis: envie de fraîcheur? Tous à l'église ou à la mer... de Flines », La Voix du Nord [En ligne], 24 août 2016, [Consulté le: 05 janv. 2022].



En été, la masse thermique absorbe la chaleur des gains solaires et la restitue plus tard, idéalement pendant les heures fraîches de la nuit. On parle de déphasage thermique

En hiver, la masse thermique fonctionne de la même manière qu'en été, mais la chaleur restituée est conservée à l'intérieur de l'enveloppe thermique.



Cette méthode ne nécessite aucune consommation d'énergie pour son fonctionnement et est économique en matériaux lorsque la structure du bâtiment fait office de masse thermique.

Le stockage thermique permet d'absorber les grandes variations de températures à l'intérieur d'un espace et améliore ainsi le confort de ses occupants sans équipement particulier.

DISSIPER

STOCKAGE THERMIQUE

Le stockage thermique a pour fonction d'équilibrer la température intérieure d'un bâtiment face aux variations du climat extérieur, de l'ensoleillement ou de sources de chaleur internes. Il conserve le climat intérieur à température constante en absorbant le surplus de chaleur et en le restituant plus tard.

Le stockage thermique est en fait un réservoir de chaleur, qui fonctionne aussi bien pour le froid que le chaud. On l'appelle aussi masse thermique ou accumulateur thermique^[36]. Ce sont des matériaux qui ont la faculté de particulièrement bien conserver la chaleur. On dit alors qu'ils ont une grande capacité thermique.

notions de physique

Voici d'abord quelques notions rapides de physique :

stratégies estivale et hivernale

- La faculté d'un matériau à emmagasiner de la chaleur est appelée *capacité thermique*. C'est une grandeur qui mesure la chaleur à apporter à un corps ou matériau, pour que celui-ci augmente sa température de un degré kelvin. Elle est en général rapportée à son volume ($J K^{-1} m^{-3}$) ou à sa masse ($J K^{-1} kg^{-1}$).
- Mais un matériau possède également un autre paramètres thermiques: sa conductivité thermique. La conductivité décrit la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par un matériau par unité de surface et par unité de temps sous l'action d'une différence de température entre les deux extrémités. En l'occurrence, la conductivité thermique permet de décrire si un matériau absorbe et restitue facilement la chaleur.

bienfaits pour la planète et l'habitant

[36] voir D. Wright, « Manuel d'architecture naturelle », Parenthèses, Marseille, 2018.

Avec ces connaissances, nous pouvons maintenant décrire ce qu'est l'inertie thermique : c'est la capacité d'un matériau à absorber et restituer du froid ou de la chaleur dans un temps donné. C'est cette inertie thermique qui est souvent employée dans la construction, car elle permet d'agir comme un régulateur de la température. Certains matériaux comme le béton, la pierre, la terre ou l'eau possèdent une bonne inertie thermique, car ils ont à la fois une grande capacité thermique et une bonne conductivité. Plus l'inertie d'un bâtiment est forte, plus il se réchauffe ou se refroidit lentement. De cette manière, le matériau permet un déphasage de la température : la température extérieure à l'instant t ne se fera que ressentir à l'intérieur au bout de x heures.

Ce phénomène est connu par tous et depuis longtemps. C'est celui qu'on ressent quand on entre dans une église par une chaude journée d'été par exemple. La pierre, avec une certaine épaisseur, freine la pénétration des températures diurnes élevées et diffuse au contraire à l'intérieur la froideur nocturne. « Cette dernière, déphasée temporellement de plusieurs heures selon le principe d'inertie thermique, se fait sentir dans l'église durant la journée »^[37], nous explique Philippe Rahm.

Ce principe vaut aussi pour l'été, où le soleil tapant sur la masse thermique en journée diffusera sa chaleur à l'intérieur pendant la nuit.

Le choix du matériau est primordial pour définir l'utilisation et l'efficacité de l'inertie thermique souhaitée, mais aussi dans l'esthétique du projet architectural. Ceux faisant de bons accumulateurs thermiques sont en général des matériaux minéraux, comme la terre, la pierre, le sable ou encore le béton. L'eau aussi, possède une très bonne capacité thermique. Mais elle présente le problème de l'enveloppe imperméable devant la contenir, en faisant plutôt un risque de fuite. Le béton a l'avantage d'être porteur. « Ses qualités mécaniques le rendent attrayant malgré une capacité calorifique [thermique] inférieure, et une dépense énergétique lourde pour sa fabrication^[38] ». La terre, la pierre et le sable sont également des matériaux se prêtant bien à une telle utilisation, car ils peuvent aussi être porteurs, ne risquent pas de fuite, ne nécessitent pas beaucoup d'énergie à leur production et son particulièrement bon marché. L'utilisation de la structure porteuse d'un bâtiment comme masse thermique est une solution particulièrement intéressante et élégante. Elle fusionne les deux fonctions en un seul élément et permet ainsi la réalisation d'économies de moyens.

Le stockage thermique correctement dimensionné permet ainsi d'améliorer le confort des occupants d'un bâtiment quand il fait trop chaud pour ventiler avec l'air extérieur, sans pour autant avoir recours à des méthodes artificielles. Pour cela, il faut cependant faire attention à certaines choses.

les matériaux

matériaux	λ	C
brique	0.6	0.38
béton	1-1.5	0.48
terre	0.75	0.32
sable	0.28	0.35
acier	45	0.94
pierre	0.8-3	0.55
eau	0.51	1.00
bois	0.07	0.17

[37] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.57.

[38] D. Wright, « Manuel d'architecture naturelle », Parenthèses, Marseille, 2018, p.162.

l'emplacement

Il est préférable que la masse thermique se trouve à l'intérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment. Comme le stockage thermique possède une bonne conductivité thermique et est donc un mauvais isolant, il n'est pas souhaitable de l'utiliser comme séparation entre l'intérieur et l'extérieur. Le choix plus précis de l'emplacement doit se faire en prenant en compte la surface d'exposition à une source de chaleur et aux besoins spatiaux et d'occupation des habitants.

La masse thermique doit être découverte et suffisamment exposée à la source afin de pouvoir absorber et restituer l'énergie calorifique. En recouvrant le stockage thermique d'un parquet ou d'un faux plafond, l'échange de chaleur sera réduit voire impossible.

Les parois intérieures et dalles intermédiaires conviennent particulièrement bien pour retenir la chaleur et la distribuer. Elles ont le plus grand potentiel de rayonnement dans plusieurs espaces à la fois. Mais en d'autres emplacements, le stockage absorbera mieux la chaleur ou permettra des configurations spatiales ou structurelles intéressantes. Un stockage en plafond bénéficie de la stratification thermique en absorbant la chaleur de l'air pendant la journée et en rayonnant vers le bas pendant la nuit. Le stockage en plancher est agréable pour les pieds froids. Le positionnement optimal n'existe pas, mais doit être un compromis entre les différentes priorités que présente un projet d'architecture en relation avec le climat extérieur.

le dimensionnement

Les dimensions du stockage thermique et le choix du matériau définissent le potentiel de réserve thermique d'une construction. Dans un projet passif, on cherche à mettre en œuvre une masse thermique appropriée pour minimiser à la fois la surchauffe et le déficit du chauffage dans des conditions climatiques normales. Si la masse thermique est trop faible, le bâtiment ne pourra pas absorber le surplus de chaleur entrant et pourra provoquer la surchauffe en été ou la surconsommation de chauffage en hiver. Dans l'autre sens, si la masse thermique est trop importante, le bâtiment pourra mettre des jours avant de chauffer.

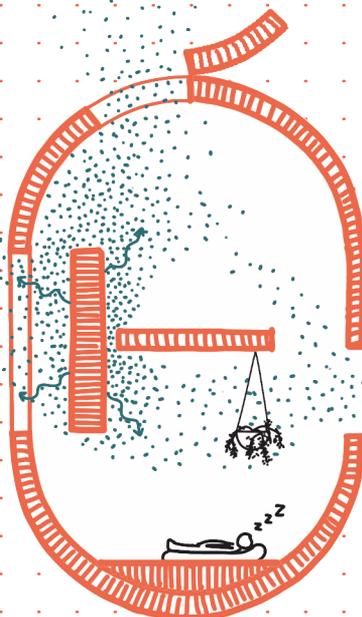
le stockage mobile

Le stockage mobile d'énergie a toujours fasciné les humains, en particulier les batteries électriques. Pourquoi ne pas faire autant avec de l'énergie thermique et ainsi tirer pleinement profit du climat dans lequel on vit?

On pourrait ainsi exposer une grande masse aux rayons du soleil pour la charger d'énergie calorifique et ensuite transporter cette masse à l'intérieur uniquement si les besoins de chauffage se feraient sentir. À l'inverse, cette masse servirait à rafraîchir les espaces intérieurs en l'exposant au ciel froid de la nuit et en la rentrant pour les heures les plus chaudes.

Que cette masse mobile prennent la forme d'un mur pivotant, d'une sphère roulante ou de volume d'eau dans un bassin, le choix est laissé au concepteur du bâtiment. Mais exploiter au mieux ce que le climat a à nous offrir et transposer cela dans un nouveau langage architectural qui met en exergue le vrai fonctionnement d'un bâtiment, n'est-ce pas séduisant?

RAFRAÎCHIR



En été, les façades du bâtiment s'ouvrent la nuit pour évacuer la chaleur stockée dans le bâtiment.

L'ouverture et la fermeture des ouvrants de nuit peut être décidée par un système domotique qui analyse certaines conditions : l'heure, la température de l'air extérieur, la température de l'air intérieur, la température de la masse thermique, la vitesse du vent et l'ouverture des protections solaires.



Le contrôle manuel induit une consommation nulle. Le contrôle automatisé induit une consommation électrique très faible.

Ce procédé permet un rafraîchissement passif très efficace, une meilleure qualité de l'air intérieur, avec un coût financier faible (sauf coût d'investissement de départ si système automatique).

RAFRAÎCHIR

RAFRAÎCHISSEMENT NOCTURNE PAR CONVECTION

Le rafraîchissement nocturne ou *night cooling*, désigne le simple fait de rafraîchir un bâtiment pendant la nuit par ventilation naturelle venant évacuer la chaleur accumulée d'un bâtiment pendant la journée.

Le night cooling fonctionne de paire avec la stockage thermique d'un bâtiment. Pendant la journée, la masse thermique absorbe l'excès de chaleur intérieure. Cet excès est évacué par ventilation naturelle la nuit : la masse thermique décharge sa chaleur vers l'air nocturne plus froid, qui est ensuite évacué hors du bâtiment. Le bâtiment et son stockage thermique ainsi refroidis, ils peuvent, avec une bonne conception, réduire les pics de températures intérieures en été entre 3 à 6 °C^[39].

Pour un bon fonctionnement du rafraîchissement nocturne, il faut que le bâtiment possède une masse thermique suffisante, et que les températures nocturnes y soient propices. En effet, si la différence de température entre le jour et la nuit est trop faible, la dissipation de la chaleur accumulée ne peut pas avoir lieu. Des températures qui restent trop élevées la nuit (>30°C) rendent ce système également peu efficace, car il ne permettrait pas au bâtiment de redescendre à une température supportable pour le corps humain. La conception des espaces pour favoriser la ventilation à l'intérieur du bâtiment est également primordiale^[40].

Ce principe fonctionne très bien dans les bâtiments inoccupés la nuit ou dans les espaces communs de logements collectifs. Les nuits parfois trop froides ou l'ouverture spontanée des ouvrants pourrait être perçue comme désagréable par un occupant en contact direct.

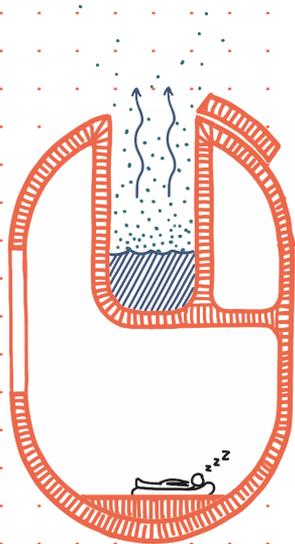
Ainsi, nos bâtiments peuvent respirer au rythme des chaudes journées d'été.

stratégies estivale
et automatisation

bienfaits pour la
planète et l'habitant

[39] « Night-time purging », Designing Buildings [en ligne], 17 déc. 2021, [consulté le 06 janv.2022].

[40] voir thème : ventilation naturelle



En été, un dispositif expose une masse étant un composant essentiel du bâtiment avec une forte inertie thermique au ciel nocturne découvert. De jour, la masse est ramenée à l'intérieur du bâtiment pour diffuser sa fraîcheur accumulée de nuit.

La mise en place de dispositifs qui s'adaptent à des conditions précises nécessite certes quelques moyens, mais permet aussi de montrer le fonctionnement d'un bâtiment à ses habitants et des paramètres qui font qu'on s'y sente bien.



Le rafraîchissement en soit ne nécessite aucune forme d'énergie. Le déplacement de matière solide ou liquide par des moteurs, vérins ou pompes entraînera une consommation très faible.

Il met à disposition un rafraîchissement très efficace, mais nécessite une surface d'exposition suffisante, des conditions météorologiques particulières et des coûts probablement plus élevés.

RAFRAÎCHIR

RAFRAÎCHISSEMENT NOCTURNE PAR RADIATION

Le rafraîchissement nocturne par radiation permet de rafraîchir n'importe quelle masse solide ou liquide bien en dessous de la température de l'air ambiant en l'exposant au ciel d'une nuit claire.

« Le rayonnement nocturne émis vers la voûte céleste est la contrepartie de l'ensoleillement reçu en cours de journée. »^[41], nous explique David Wright. La nuit, l'échange d'énergie entre la terre et l'espace s'inverse, car le soleil n'est plus là. Ainsi, la terre émet de l'énergie sous la forme de rayonnement infrarouge, dont une petite partie est absorbée par l'atmosphère et la majeure partie par le vide sidéral à la température glaciale d'environ -273°C , soit 0° Kelvin. Pour que cela fonctionne, le ciel doit être découvert. La couverture nuageuse freine ces déperditions radiante en absorbant une partie du rayonnement thermique et en renvoyant une partie vers la terre. Cette technique est si efficace, qu'elle était encore utilisée au début du 20^{ème} siècle dans les déserts du Moyen-Orient pour fabriquer de la glace par temps clair sans gel.

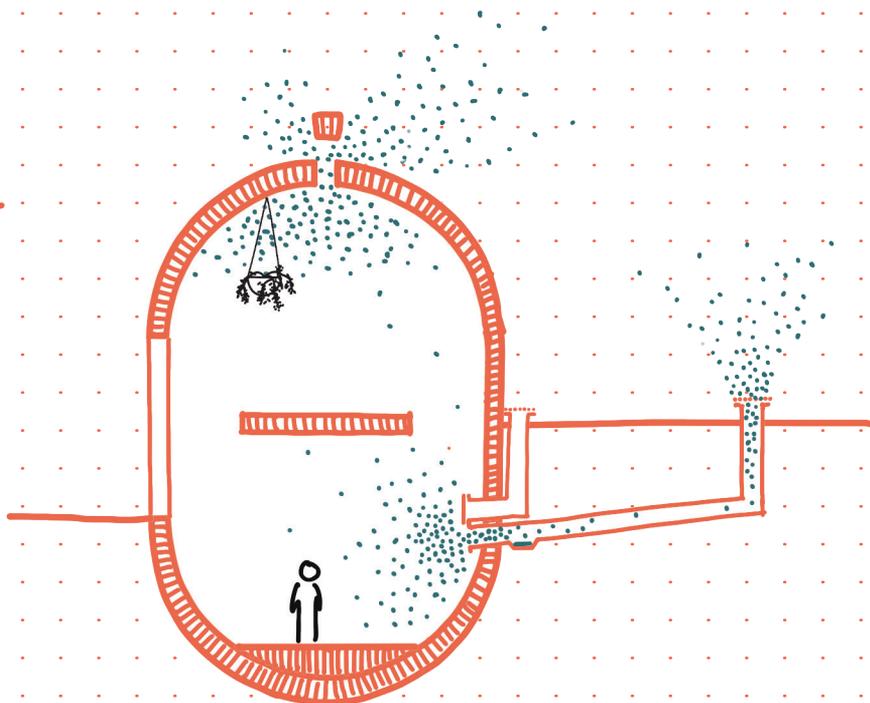
stratégies estivale
et originalité

Les déperditions nocturnes par radiation ont lieu toute l'année. C'est pourquoi, en facilitant cette émission en été, on peut refroidir efficacement par ciel découvert les masses échauffées par le rayonnement solaire absorbé au cours de la journée.

De la même manière qu'on sort le linge propre encore humide pour le faire sécher, pourquoi ne pas sortir son accumulateur thermique ou exposer un large volume d'eau au ciel refroidissant? Voilà ce qui ferait d'un bâtiment une réelle machine climatique.

bienfaits pour la
planète et l'habitant

[41] D. Wright, « Manuel d'architecture naturelle », Parenthèses, Marseille, 2018, p.204.



En été, l'air extérieur est plus chaud que la température du sol. Le tube enterré permet un apport d'air frais en utilisant le gradient de température existant entre l'air extérieur et la température du sol. La prise d'air se situe de préférence au nord.



Le puits climatique ne nécessite en soit aucune énergie, à moins que l'extraction de l'air vicié se fasse au moyen d'un ventilateur.

En hiver, le sol est plus chaud que la température de l'air extérieur. Le tube enterré pré-chauffe l'air entrant, en réduisant l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur et par conséquent, réduit la nécessité de chauffage. La pris d'air se situe de préférence au sud:



Cette solution permet le rafraîchissement, réchauffage, préchauffage ou la mise hors gel sans équipement

PUITS CLIMATIQUE

Le puits climatique aéraulique est un conduit d'air enterré qui profite de la géothermie du sol pour réchauffer ou refroidir l'air extérieur avant qu'il ne pénètre dans le bâtiment.

Ce dispositif, permet d'influencer la température d'une partie de l'air neuf de renouvellement avant de rentrer dans le bâtiment. Pour cela, des tuyaux doivent être enterrés à une profondeur suffisante en hors gel. En plaine, la température à 2m de profondeur reste constante autour des 8°C. Une longueur suffisante de tuyaux doit être prévue afin que l'échange de chaleur puisse être efficace. Ainsi, le dispositif exploite l'inertie thermique de la masse de terre environnant le tuyaux, et permet au puits climatique d'agir comme un régulateur naturel de température^[42].

Déjà pendant la Renaissance ce principe était utilisé dans la Villa Rotonda de Palladio en 1571, ou encore la Villa Aeolia, construite en 1560 par l'humaniste Francesco Trento. Vincenzo Scamozzi les appelaient alors les *ventiducts*, utilisés pour «refroidir les pièces et établir une délicieuse atmosphère durant l'été^[43]».

Cette solution passive est particulièrement intéressante, car elle peut faire descendre un air extérieur de 30°C à moins de 20°C. Varier sur la position nord/sud des prises d'air peut être une stratégie intéressante à exploiter pour maximiser les rendements.

Le couplage avec une ventilation mécanique contrôlée (VMC) simple flux voire double flux permet également d'améliorer son efficacité. Cela permet de récupérer la chaleur calorifique de l'air sortant et de la réinjecter à l'air entrant, faisant ainsi des économies de chauffage supplémentaire^[44]. En raison des travaux nécessaires, il est important d'intégrer le puits climatique dans le projet dès sa conception.

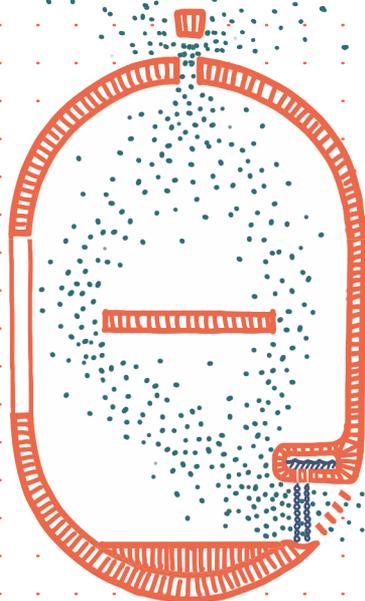
[42] voir « stockage thermique » dans : D. Wright, « Manuel d'architecture naturelle », Parenthèses, Marseille, 2018.

[43] Vincenzo Scamozzi, « L'idea della architettura universale », Venise, 1615; dans P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.126

[44] « Principe de fonctionnement du puits canadien aéraulique », ECOinfos [en ligne], 19 janv. 2021, [consulté le : 05 janv. 2022].

stratégies estivale et hivernale

bienfaits pour la planète et l'habitant



En été, l'air extérieur peut être rafraîchi au travers de l'évaporation de l'eau. L'air frais traverse les espaces intérieurs et emporte avec lui plus de chaleur qu'il n'avait à l'entrée.

Cette méthode est une alternative aux climatiseurs particulièrement intéressante. Elle nécessite dix fois moins d'énergie, ne rejette pas de chaleur à l'extérieur et n'utilise pas de fluides réfrigérant (très nocif pour l'environnement).



Le rafraîchissement par évaporation ne nécessite en soit aucune énergie, à moins que l'extraction de l'air vicié se fasse au moyen d'un ventilateur.

Cette solution permet le rafraîchissement d'espaces intérieur avec seulement de l'eau et un courant d'air

RAFRAÎCHIR

RAFRAÎCHISSEMENT ADIABATIQUE

Le rafraîchissement adiabatique est le simple fait de faire évaporer de l'eau afin d'en rafraîchir l'air.

Ce nom compliqué nous vient du grec *adiabatos* et signifie à l'origine ce qui est infranchissable. Dans notre langue moderne il se définit comme étant « une transformation au cours de laquelle un système de corps n'échange pas de chaleur avec le milieu environnant^[45] ».

Pour que l'eau passe de son état liquide à un état gazeux, elle nécessite de l'énergie. La mise en contact avec de l'air chaud permet son évaporation en lui apportant cette énergie et provoque l'abaissement de la température de l'air. On parle de refroidissement adiabatique car l'énergie totale de l'air reste la même. L'énergie sensible est transformée en énergie latente sous forme de vapeur d'eau. La chaleur latente^[46] possède un potentiel de stockage énergétique supérieur à la chaleur sensible^[47]. Ainsi, un air chargé en humidité accroît sa capacité de transport calorifique, c'est à dire de chaleur.

stratégies estivale et originalité

Un air traversant un échangeur adiabatique emporte donc avec lui plus de chaleur qu'il n'avait à l'entrée : l'air s'en voit refroidi. Le résultat est le même qu'avec un climatiseur, à l'exception qu'il charge l'air sortant d'humidité et qu'il ne consomme pas d'énergie. Même avec une ventilation mécanique, ce mode de rafraîchissement consomme dix fois moins d'énergie qu'une climatisation et ne rejette pas de chaleur vers l'extérieur. Cependant, on ne peut pas contrôler avec précision la température sortante, mais on peut contrôler le débit d'air le traversant. Cette méthode fonctionne dans toutes les régions tempérées du globe, où la chaleur n'est pas associée à une humidité trop importante.

bienfaits pour la planète et l'habitant

[45] « définition : adiabatique », Larousse [en ligne], [consulté le 06 janv.2022].

[46] la chaleur latente modifie l'état physique d'une matière (solide, liquide ou gazeux).

[47] la chaleur sensible modifie la température d'une matière.

Cet échangeur adiabatique est connu de civilisations bien avant la notre, que ce soit pour l'habitat ou même la conservation d'aliments. Le refroidissement adiabatique refait son apparition après les premiers chocs pétrolier dans les années 1970, où l'on commençait à chercher des solutions de rafraîchissement moins énergivores^[48]. Jusqu'à aujourd'hui, ce système, le plus souvent mécanisé, se retrouve dans de larges halles industrielles, où la climatisation auraient été trop onéreuse.

Ce rafraîchissement adiabatique peut avoir lieu dès lors qu'il y a de l'eau et un courant d'air. Cela peut être un simple drap humide devant un ventilateur, un brumisateurs ou une fontaine au milieu d'un patio ou bien une installation plus complexe avec ventilation et des feutres saturés en eau.

Les maisons à patio orientales exploitent plusieurs méthodes de rafraîchissement dont celui par évaporation. Ce sont des constructions où les courants d'air constants sont créés par appel d'air sur les façades extérieures exposées au soleil. Au centre de la maison, à l'ombre de latis, l'air plus frais peut se charger en humidité grâce au plan d'eau ou à la fontaine présente^[49]. Il traverse ensuite les différentes pièces de la demeure, emportant avec lui la chaleur écrasante avant d'être rejeté vers l'extérieur au travers de petites fenêtres ou moucharabiehs.

On pourrait très bien s'imaginer un tel dispositif à l'échelle d'un immeuble d'habitation, et pas seulement d'une maison. Si l'air neuf provient d'une zone extérieure ombragée, ou d'un puits climatique, et traverse un tissu saturé d'eau, il sera tout frais à son entrée dans le logement. Avec une faible température, il pourra alors se charger d'une importante quantité de chaleur présente dans l'habitat. Pendant que l'air humidifié circule à l'intérieur, il prendra de la chaleur sur tous les corps rencontrés avant d'être rejeté vers l'extérieur.

L'efficacité d'un refroidissement forcé augmente avec la vitesse du courant d'air et une température élevée. Pour que le rafraîchissement fonctionne, il ne suffit pas seulement d'injecter l'air frais, mais il faut également extraire l'air humide après avoir absorbé la chaleur.

L'utilisation de l'eau comme solution de rafraîchissement divise l'opinion publique. L'eau est une ressource rare et précieuse quand elle est disponible en quantité limitée, en été par exemple. Mais pour certains elle ne semble pas avoir un potentiel suffisant pour lutter à long terme contre la forte augmentation des épisodes de chaleur à venir. Mais les expériences menées avec des brumisateurs directement sur le domaine public dans le cadre du projet

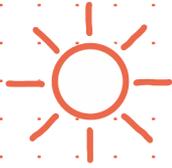
[48] G. Gaget, « Le refroidissement adiabatique, le futur de la climatisation », XPair [en ligne], 2020. [consulté le 06 janv.2022].

[49] M. Bencherif et S. Chaouche, « La maison urbaine à patio, réponse architecturale aux contraintes climatiques du milieu aride chaud », Université Mentouri, Constantine, 2013.

VISION piloté par SUEZ, montre bien que les utilisateurs de ces dispositifs approuvent tout à fait leur efficacité^[50]. La rareté de l'eau en été peut être palliée par des systèmes de stockage et de filtration. Ainsi, l'eau deviendrait non seulement une solution efficace contre les périodes de canicule, mais aussi une réelle matière urbaine.

L'air frais se dégageant d'un plan d'eau peut certes être bénéfique pour un bâtiment et ses habitants en s'infiltrant au travers des espaces communs ou dessertes dans les étages avant de traverser les logements. Mais elle peut également réjouir les autres habitants du quartier, en rafraîchissant ses abords et permettre ainsi une interaction sociale.

[50] « Vision - quelles solutions de rafraîchissement basées sur l'eau en ville? », l'Eau de Bordeaux Métropole, l'Agence de l'Eau Adour Garonne, SUEZ - le LyRE, E6-consulting, et Atelier-paysages (ACCP), 2021, p.135.



En savoir plus :

Les parcs influencent la température autour d'eux, et ce jusqu'à 300m!

source : S. Coccolo, « Urban greening », Lausanne, 2021



En été, l'air extérieur peut être rafraîchi par l'évapotranspiration d'une masse végétale. Elle procure en même temps de l'ombrage et peut canaliser le vent pour améliorer la ventilation naturelle.

En moyenne, par journée ensoleillée, un bouleau évapore par jour 75l d'eau, un hêtre 100l et un tilleul 200l. Pour une forêt, cela ferait 20 à 40 m³ d'eau par hectare et par jour.

sources : « Eau et forêt, une association naturelle. », Office National des Forêts, [en ligne, consulté le 06 janv.2022].



Le rafraîchissement par évaporation ne nécessite en soit aucune énergie, à moins que l'extraction de l'air vicié se fasse au moyen d'un ventilateur.

Cette solution permet le rafraîchissement d'espaces intérieur avec seulement de l'eau et un courant d'air

RAFRAÎCHIR

RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPOTRANSPIRATION

En savoir plus :

Un arbre peut absorber 25kg de CO₂/an. Un lausannois dégage environ 13'900kg de CO₂/an. Ainsi, il faudrait 556 arbres pour absorber l'emprunte carbone annuelle d'une personne. Les 88'000 arbres urbains de Lausanne n'absorbent donc que le CO₂ de 158 personnes.

stratégies estivale et originalité

bienfaits pour la planète et l'habitant

L'évapotranspiration résulte de deux phénomènes : l'évaporation comme phénomène purement physique du changement d'état d'un liquide, et la transpiration, phénomène biologique permettant la régulation thermique d'un organisme vivant.

L'évapotranspiration est un phénomène que nous connaissons tous. Quand nous faisons du sport, notre corps réagit en transpirant. Il libère de l'eau au travers des pores de notre peau. Celle-ci s'évapore et refroidit ainsi notre organisme par les mêmes procédés que le rafraîchissement adiabatique. La végétation relâche également de la vapeur d'eau au travers de ses stomates. Cela fait partie de son cycle de la photosynthèse. Les stomates s'ouvrent pour capturer du CO₂ et relâchent par la même occasion du H₂O si le gradient d'humidité le permet. Cette transpiration lui permet de faire circuler de la sève brute nécessaire à sa croissance et de conserver une température basse^[51]. En plus, le feuillage absorbe le spectre solaire nécessaire pour la photosynthèse et renvoie le rayonnement à grande longueur d'ondes, c'est à dire de la chaleur. Au final, dépendant des espèces et du lieu, un parc végétal permet de réduire la température de l'air de -2 à -6 °C^[52].

Un groupe de travail pour l'arborisation de Lausanne nous explique : « Les services écosystémiques rendus sont multiples: régulation microclimatique, atténuation des nuisances sonores, épuration de l'air, séquestration de carbone et contribution aux trames écologiques pour ne citer que les plus importantes. Les arbres contribuent par ailleurs au bien-être et à la santé de la population vivant dans un espace urbain^[53] ». Avec toute ça, qui ne voudrait pas d'arbres chez soi?

[51] voir « Évapotranspiration », Wikipedia, 24 oct. 2021. [en ligne, consulté le 06 janv.2022].

[52] S. Coccolo, « Urban greening », Lausanne, 2021.

[53] J. Pellet, V. Sonnay, C. Randin, P. Sigg, M. Rosselet, et E. Graz, « Arborisation urbaine lausannoise et changements climatiques », janv. 2021.

ÉTUDE DE CAS



lieu : Céligny (GE), Suisse

date : 2016

programme : 4 immeubles de 52 logements,
et 2 commerces, 1 parking souterrain

nature du projet : nouvelle construction

réalisation : concours 2012, réalisation 2013-2016

architecte : bunq architectes, Nyon

maître de l'ouvrage : commune de Céligny

coûts des travaux : 24'000'000 CHF

partenaires :

Perenzia ingénieurs, physique du bâtiment, Lau-
sanne

Energy Management & R-E Moser, ingénieurs
CVS, Lausanne

matériaux : béton, briques isolantes en terre cuite,
bois et verre

stratégies climatiques :

protection solaire

ventilation naturelle hybride : effet de cheminée,
transversale et mécanique

stockage thermique

chauffages d'eau par tubes évacués

chauffage de quartier au bois

résultats espérés :

économie d'énergie et d'argent

L'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE PAR L'ÉCONOMIE DE MOYENS

LOGEMENTS LES GRANDS CHÊNES BUNQ ARCHITECTES

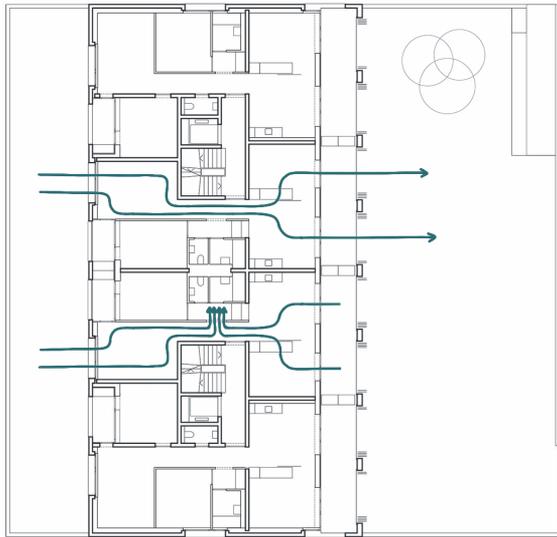
fig. 55 :
bâtiment C et sa cour

Le nouveau quartier *Les Grands Chênes* à Céligny (GE) est le fruit du bureau d'architecture bunq situé à Nyon. Bien qu'inscrit dans un climat que nous connaissons bien, il puise son inspiration climatique de régions bien plus lointaines et plus arides : le moyen-orient. Les quatre volumes positionnés en constellation s'inscrivent dans un paysage aux allures pourtant champêtres. L'utilisation d'une ventilation naturelle hybride et particulièrement économique illustre le potentiel de ce que le low cost a à nous offrir en terme d'efficacité, d'intégration et de confort de vivre.

description

Le nouveau quartier de Céligny, une commune entre Genève et Nyon, cherche malgré sa rapide urbanisation, à conserver une identité de village. La construction de quatre bâtiments forme la première phase d'un plus large ensemble que formera le quartier des Grands Chênes. Ainsi, chaque bâtiment y possède une cour délimitée par un muret. Ce sont des espaces semi-publics offrant un seuil à l'entrée des immeubles. Ils peuvent être aménagés en jardin, en lieu de vie commun ou conservé comme cour minérale. Ces cours offrent un lieu de vie commun aux habitants d'un même immeuble. Une cour plus publique, marquée par la présence d'une fontaine, accueille des commerces. Une autre donnant sur le parking peut se transformer en espace de fête, donnant un lieu de rassemblement à tout le quartier.

Les appartements des différents blocs sont pour la plupart traversants, profitant ainsi d'une exposition sud-est / nord-ouest. On dénombre 4 étages par bloc d'habitations. Chaque appartement possède une loggia donnant sur la cour et qui, dans les étages, s'ouvre sur les champs avoisinants. Cette loggia relie les appartements entre eux et peut laisser place à une forme de vie commune entre voisins immédiats. Elle peut se fermer au travers de



grands volets en bois.

Les façades ainsi libérées, c'est au travers de noyaux centraux que l'accès aux appartements est possible, abritant escalier et ascenseur. Dans les appartements, les espaces de jour s'organisent en coulisse, ce qui facilite la ventilation naturelle, et permet au séjour de donner sur la cour et à la salle à manger sur les champs, ou inversement suivant le bâtiment.

parcours de l'air

fig. 56 :
plan de site

Bunq, appuyé des ingénieurs du bureau Perenzia, offre ici un dispositif climatique d'une simplicité déconcertante. Des matériaux de qualités et naturels, une conception d'un système de ventilation naturel hybride efficace et un chauffage d'appoint par combustion de bois local : voilà ce qui forme la stratégie de gestion thermique de ce complexe. L'organisation spatiale simple et efficace des espaces, fonctionne de paire avec son organisation climatique. La définition de différentes zones thermiques dialogue avec l'usage au degré de collectivité différencié de ces mêmes espaces. Chaque zone thermique possède une enveloppe à la matérialité bien distincte. Ainsi on distingue la cour extérieure (pavés en terre cuite), les loggias (béton) et les espaces intérieurs (bois), possédant chacun ses caractéristiques et mode de fonctionnement climatiques propres, ainsi que son degré d'utilisation par les habitants du quartier.

fig. 57 :
plan d'un bâtiment A
ou B

ventilation naturelle
de confort en été

ventilation naturelle
par effet de cheminée
toute l'année

Le parcours de l'air commence par l'origine du vent. Dans la région de Nyon, les vents dominants proviennent du sud-ouest ou du nord-ouest^[1], de manière parallèle au Jura. Ceux-ci atteignent les bâtiments A et B du complexe (ceux que nous allons approfondir), sur leur petite façade au sud-ouest ou leur grande façade au nord-ouest. En été, la loggia donnant au sud-ouest saura protéger la façade intérieure d'une exposition directe au soleil, tandis qu'en hiver, elle protégera ses habitants des vents violents. Les appartements disposés parallèlement les uns aux autres, facilitent la ventilation traversante. Le cloisonnement ouvert permet une connexion directe entre le séjour et la salle à manger de part et d'autre de l'appartement. Ainsi, le flux d'air ne rencontre aucun obstacle dans son mouvement. Un concept peu utilisé dans le domaine du logement, une ventilation naturelle hybride, est mis en place par le bureau Perenzia, spécialistes en physique du bâtiment un peu alternative. Leur slogan « le plus compliqué c'est de faire simple » en est bien la preuve. La technique s'appuie sur l'effet de cheminée^[2] et donc sur les différences de pression atmosphérique, similaire aux tours à vent que l'on peut trouver en perse. Le système de ventilation installé permet de gérer le débit d'air de base nécessaire au renouvellement de l'air intérieur. Ce débit d'air correspond à la principale source de ventilation pendant les périodes de temps froid où l'on cherche à réduire au maximum les déperditions thermiques vers l'extérieur et où

[1] voir rose des vents Nyon en annexe

[2] voir thème « effet de cheminée »



fig. 58 :
loggia continue d'un
bâtiment A ou B

L'on admet que les fenêtres sont fermées^[3]. L'air entrant dans le bâtiment est prélevé directement à l'extérieur des bâtiments, depuis la façade nord à l'ombre des rayons du soleil ou depuis la loggia au sud. L'air neuf pénètre dans l'appartement au travers de prises d'air insérées en façade dans le dormant des cadres de fenêtre. Le flux d'air traverse les pièces de jour de l'appartement en se chargeant de l'excès d'énergie calorifique, d'humidité et d'autres éventuels polluants. Les parois en béton, ont été doublée sur leur face intérieure par des briques de terre cuite isolantes, dont « la matérialité poreuse et respirante régule l'humidité ambiante ^[4]». La reprise de l'air vicié se fait au travers de bouches d'extraction hygro-réglables^[5] situées dans les salles de bain au centre de l'appartement. Celles-ci sont connectées aux gaines de ventilation parfaitement verticales, permettant ainsi un flux d'air constant selon le principe de l'effet de cheminée. Le fait de limiter la ventilation en fonction de l'humidité relative des logements a pour conséquence un débit d'air plus faible que les techniques traditionnelles et permet ainsi des économies de chauffage. Ce tirage thermique est renforcé en plaçant le haut du conduit le plus haut possible en zone de forte dépression, c'est à dire sur le toit et en plein soleil.

Cette ventilation naturelle est couplée à une assistance mécanique intermittente à basse pression installée en toiture sur le haut du conduit. Le ventilateur s'enclenche lorsque le vent et la température ne créés pas suffisamment d'appel d'air, ou bien quand un débit important est nécessaire lors des heures de forte demande en matinée et en soirée. Le ventilateur aspire à ce moment là mécaniquement l'air dans les conduits.

fig. 59 :
prises d'air hygro-réglables discrètement insérées dans le dormant des fenêtres

Le débit d'air minimal est assuré par le système de ventilation hybride. Mais en été il est parfois nécessaire de pouvoir déplacer de plus larges volumes d'air. Par forte chaleur, la cour minérale exposée au soleil fera considérablement augmenter la température de l'air extérieur. L'air chaud s'élèvera vers le haut, créant une zone de dépression en son bas, qui aspire l'air frais provenant de la façade nord. Cet air bénéficie de la fraîcheur de son environnement, une végétation luxuriante du cordon boisé avoisinant. Le courant d'air traverse les appartements et dissipe la chaleur accumulée dans les sols et plafonds en béton. Ces éléments de structure laissés apparent jouent un rôle de stockage thermique utilisable aussi bien en été qu'en hiver. L'installation de baies vitrées plus large sur la façade sud renforce l'effet de ventilation en maximisant sa vitesse^[6]

fig. 60 :
haut de l'extraction de ventilation naturelle hybride

La simplicité du système, malgré le recours intermittent à une ventilation mécanique, permet une économie d'énergie considérable. La ventilation naturelle exerce une pression environ dix fois moins importante qu'une ven-

source :

© bunq

© David Gagnebin de Bons

[3] hypothèse personnelle non spécifiée dans les sources du projet

[4] A. Comment, « C'est dans l'air: la ventilation naturelle », Espazium, 2021. [consulté le janv. 10, 2022].

[5] permettant un débit d'air variable en fonction de l'humidité relative de l'air

[6] cf. croquis explicatif

tilation mécanique^[7], tout en conservant des bons débits et une qualité de l'air intérieur saine. Le fait que l'air chaud soit expulsé en hiver sans récupération de la chaleur est un choix assumé par les concepteurs. La chaleur extraite est remplacée quand cela est nécessaire par un chauffage de quartier à bois jugé renouvelable. Cette solution présente la même performance énergétique qu'un système double flux, mais coûte trois fois moins cher. Ainsi, en comparant les coûts de maintenance, de production ou récupération d'énergie et d'électricité dépensées par les deux variantes, le ventilation hybride hygro-réglable revient au bout de 20 ans à 94'280 CHF, tandis que le double flux à 239'040 CHF^[8], tout ça pour une consommation d'énergie équivalente (16.5kWh/m²/an contre 16.1kWh/m²/an). Selon le bureau Perenzia, la ventilation hybride semble mieux adaptée aux projets d'habitation qui veulent rester simples et sobres.

En plus des installations de ventilation et de chauffage, des tubes évacués en toiture assurent le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Les tubes évacués sont une sorte de panneaux solaires thermiques particulièrement efficaces même par temps froid et nuageux.

Un suivi de performances réelles a été financé par la Mairie de Céligny, le Fonds Cogener et l'Office cantonal de l'énergie (OCEN) entre 2016 et 2019. Celui-ci a permis de vérifier les données de base du projet. Il s'est avéré qu'en été, une sur-ventilation des espaces intérieurs étaient à déplorer. La cause en était une surchauffe des appartements, avec des fenêtres maintenues en imposte qui asséchaient l'air intérieur. Les résultats saisonniers étaient en partie faussés par le réglage mal calibré de l'installation de chauffage, ayant pour conséquence des températures de 24°C en intérieur pendant l'hiver.

Malgré les différents aléas que le système de ventilation naturel hybride ai pu rencontrer, il apparaît que cette solution offre de nombreux avantages: moins coûteuse, moins d'entretien, plus fiable, plus compact, et tout cela pour une efficacité énergétique similaire à une ventilation mécanique double flux. Elle s'intègre dans un ensemble architectural soigné et épuré, qui exprime une certaine simplicité de fonctionnement et de vie, à l'image de son implantation rurale. Cependant, quelques choix architecturaux et climatiques restent sans réponse.

critique et opinion
personnel

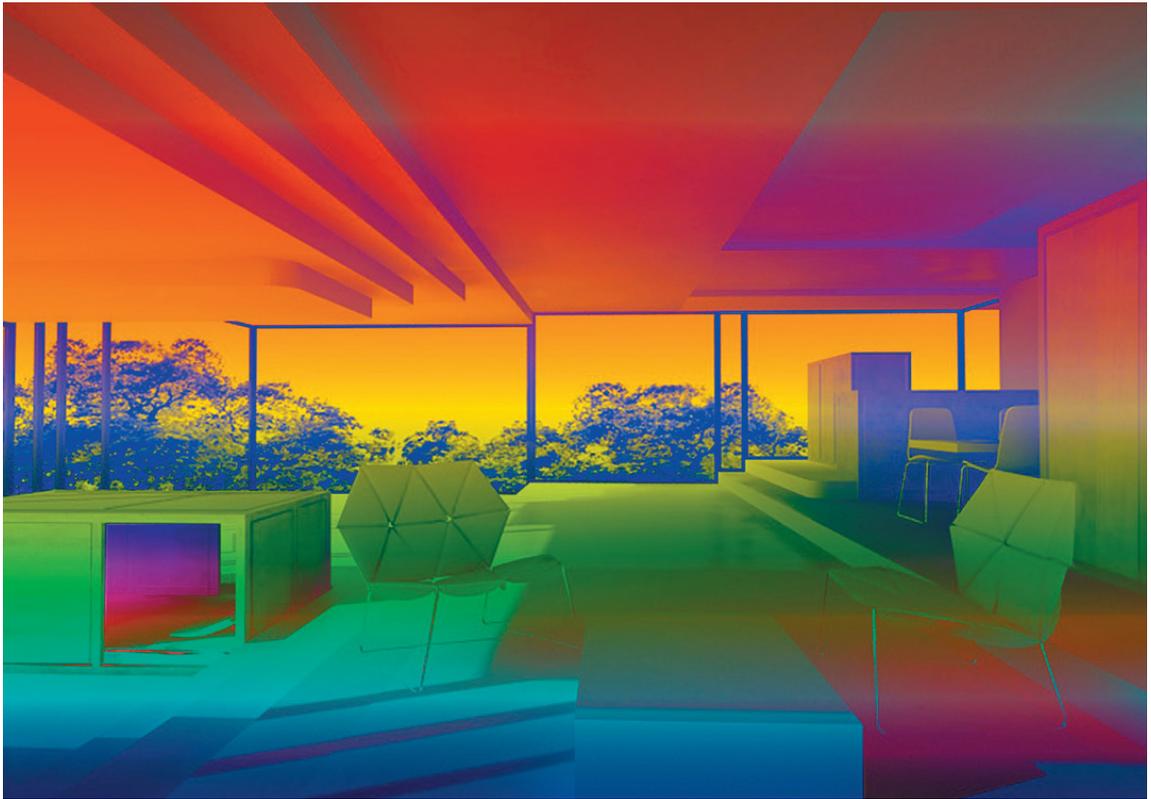
C'est en premier lieu le choix d'une source de chaleur ponctuelle par combustion de bois qui m'interpelle. Bien que le bois ne soit pas une énergie fossile, sa combustion génère malgré tout du CO₂. Or, le contexte de changement climatique que nous avons vus, ne permet plus le rejet de CO₂, car il favorise l'effet de serre et donc le réchauffement de la planète. Peut être

[7] A. Comment, « C'est dans l'air: la ventilation naturelle », Espazium, 2021. [consulté le janv. 10, 2022].

[8] « Ventilation naturelle et hybride - Céligny, logements », Perenzia [en ligne]. [consulté le janv. 10, 2022].

qu'avec des moyens financiers légèrement plus importants, un stockage thermique sur plusieurs jours ou semaines au travers d'une cuve isolée et rempli d'eau chaude dont la source de chaleur serait des panneaux thermiques supplémentaires installés en toiture, aurai pu remplacer ce choix. Ensuite, le fort caractère minéral des places au bas des bâtiments me laisse songeur. La simplicité de leur ligne de contour et la régularité des pavés rouge terre séduit l'œil. Mais alors que les villes cherchent à combattre les îlots de chaleur urbain en s'adaptant à un contexte existant, c'est ici une création délibérée de ces points chauds qui est remise en question. La couleur sombre et la matière à forte inertie thermique au pied des loggias ne peut pas contrebalancer le contexte verdoyant aux alentours. Bien que cela permette un tirage thermique naturel en été par différence de pression avec la face nord et fraîche des bâtiments, sacrifier la place et son aspect communautaire en été semble être un choix particulier. La radicalité des principes de ventilation et d'hygro-régulation semble se perdre dans la matérialité de leur mise en place. Il est dommage de s'apercevoir que les briques en terre cuite isolantes prévues comme système porteur dans les premières phases du projet aient été remplacé par des murs en béton, où ces briques ne sont plus qu'un parement intérieur. Les mettre en évidence dans les espaces intérieurs aurait été un moyen original de lier l'usager au fonctionnement de son habitat, ainsi que de lier les espaces intérieurs et extérieurs par une continuité de la matière. Il semblerait que l'usage extensif du béton répandu en Suisse ai pris le dessus sur des intentions de départ pourtant bonne.

Ces quelques choix remis en question ont probablement leur raison dans la réalité constructive du projet et son acceptabilité auprès des instances concernées. Il reste néanmoins un très bon exemple, de ce que Mies van der Rohe appellerait « less is more ».



lieu : Hambourg, Allemagne

date : 2010

programme : logement

nature du projet : nouvelle construction

réalisation : non-réalisé

maître de l'ouvrage : IBA Hamburg

architecte : Philippe Rahm architectes, Paris

partenaires :

fabric | ch, architecture, interaction et recherche,
Lausanne

Arup, informatique, Sidney

EPFL Distributed Intelligent Systems and Algorithms

Laboratory (DISAL), Lausanne

Werner Sobek, BET structure, Stuttgart

Weinmann Energies, HQE, Suisse

matériaux : béton et verre

stratégies climatiques :

stratification thermique

puits climatique (avec prises d'air différenciées)

stockage thermique

ventilation mécanique

résultats espérés :

économie d'énergie et par conséquent réduction
des émissions de gaz à effet de serre

LA STRATIFICATION THERMIQUE COMME VECTEUR SPATIAL

APPARTEMENTS CONVECTIFS PHILIPPE RAHM ARCHITECTES

fig. 61 :
rendu intérieur avec
filtre thermique

Appartements convectifs est un projet de trois appartements commandés par l'IBA pour un nouveau quartier à Hambourg. La disposition spatiale de l'espace et des fonctions repose sur la différence de température entre le sol et le plafond dû à la stratification thermique^[1]. Cette différence peut atteindre les 10°C. La variation en hauteur de la dalle amplifie ce phénomène et forme un paysage nivelé, où activité et habillement migrent en fonction du paysage thermique dessiné. Outre l'expérience spatiale qui en résulte, ce projet recherche l'économie d'énergie dépensée dans le bâtiment en s'appropriant les variations physiques de la température dans l'espace.

le concept

Philippe Rahm propose ici un plan libre revisité, rejetant l'idée d'une organisation spatiale strictement horizontale, en faveur d'une organisation verticale définie par des questions d'activité, d'habillement et de gradient de température. Pour cela, il joue avec les lois de la thermodynamique des fluides, dont nous avons vu la stratification thermique : les masses d'air chaud montent, tandis que l'air froid descend.

Nos espaces habituels dans un logement sont définis par des fonctions, un degré d'activité physique^[2] et un degré d'habillement^[3]. La température n'a pas besoin d'être la même dans chaque pièce. La température dans une chambre à coucher peut être réduite à 16°C, car nous avons une couverture pour nous protéger du froid. Dans la cuisine, nous sommes habillés,

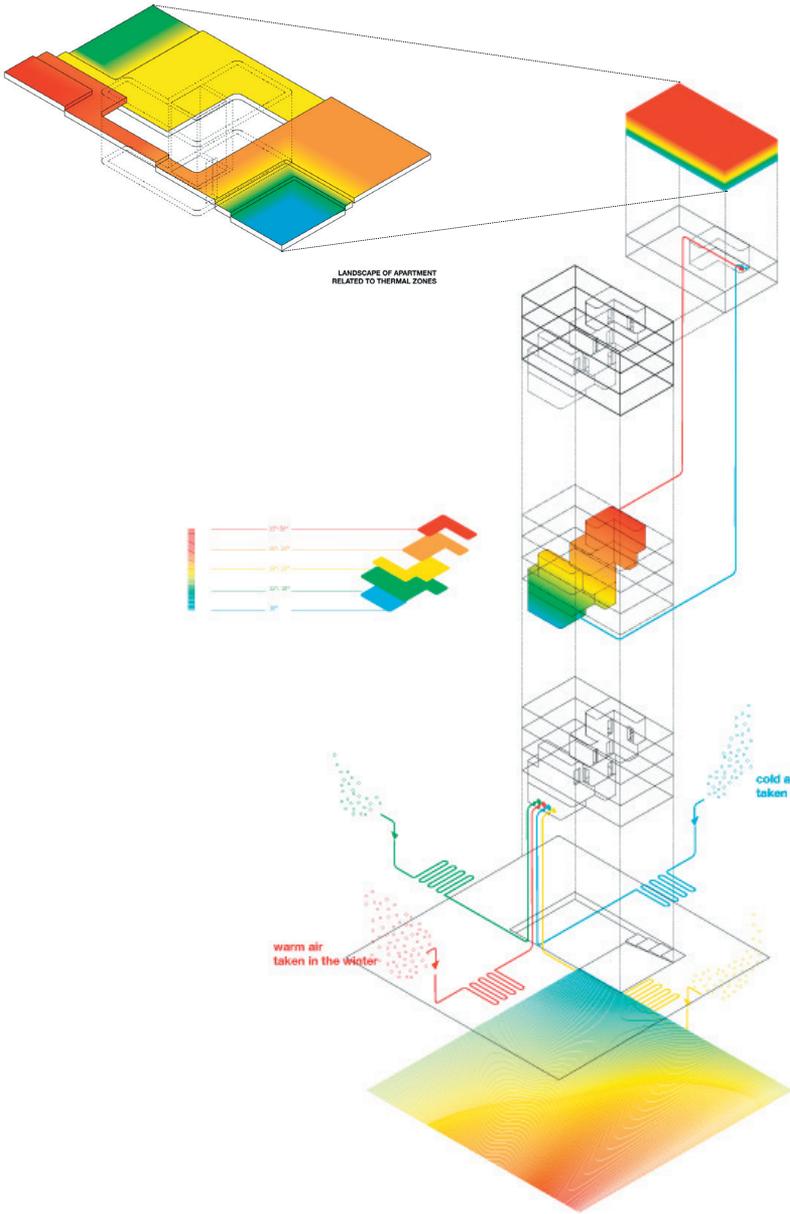
source :

© Philippe Rahm Architectes

[1] voir thème «stratification thermique »

[2] aussi appelé *metabolic rate* et se mesure en [met]

[3] aussi appelé *thermal insulation of clothes* et se mesure en [clo]



appartement

espaces communs

sol naturel

**fig. 62 : coupe
diagrammatique d'un
appartement**

fonctions selon les zones thermiques

debout et faisons une activité physique. La température de l'air n'a pas besoin de dépasser les 18°C. Dans le salon, une température de 20°C est nécessaire car c'est souvent un lieu de repos, tout en étant habillé. La salle de bain est la pièce la plus chaude, car nous y sommes nus. Philippe Rahm et son équipe utilise le gradient thermique qui se crée naturellement dans un volume d'air, pour répartir verticalement les différents espaces avec leurs températures d'usage. Selon les diagrammes fournis par l'architecte, la différence de température entre la pièce la plus chaude et la plus froide est de l'ordre de 4°C, ce qui semble relativement intéressant. Ainsi, nous trouverons tout en bas l'espace le plus froid avec la chambre à coucher, puis la cuisine, le salon, et enfin la pièce la plus chaude, la salle de bain. Il en résulte un paysage thermique, où les dalles des différents étages s'extrudent vers le haut ou vers le bas, où chaque pièce n'est plus définie par le périmètre de ses murs, mais par son altitude vis à vis des autres plateformes. De la stratification des températures en résulte donc une stratification des dalles, qui reflète l'apparence singulière du bâtiment. Elle est preuve pour tout passant, que la recherche d'un nouveau mode de vie se passe ici.

parcours de l'air

L'air est un fluide dont le parcours est complexe à saisir et encore plus à concevoir. Le projet des appartements convectifs ne se porte pas uniquement sur la stratification thermique dans un logement, mais prévoit également tout une réflexion sur l'apport de l'air frais à l'intérieur de ceux-ci, tout en minimisant les dépenses énergétiques.

**fig. 63 : système de
renouvellement d'air
à double flux**

chemins alternatifs de l'air dépendant de la saison et de l'heure de la journée, contrôlé par ordinateur

L'air extérieur est revalorisé, en le filtrant de manière naturelle avant d'atteindre le bâtiment. Pour cela, des arbres aux feuilles duveteuses sont plantées au sud-ouest du bâtiment, face au vent dominant, afin de retenir poussières et pollution. Une fois l'air purifié, deux prises d'air différentes sont prévues : une pour l'été et une pour l'hiver. En hiver, le côté ensoleillé au sud est favorisé, dont l'espèce de l'herbe est choisie pour être particulièrement sombre et ainsi absorber beaucoup de chaleur. Le sol et l'air ainsi réchauffés, c'est de l'air déjà préchauffé qui s'introduit dans le conduit du puits climatique. En été au contraire, la prise d'air utilisée se trouve au nord, dans un environnement le plus frais possible, composé de grands arbres projetant de l'ombre et d'herbe particulièrement claire afin de renvoyer le plus possible de rayonnement solaire. Même la plantation de menthe aux propriétés rafraîchissantes est envisagée. Lors d'une chaude journée d'été, l'air déjà frais à la surface est également introduit sous terre au travers d'un puits canadien, où l'échange thermique avec le sol fera encore descendre la température de l'air entrant.

Tout air entrant dans le bâtiment passe au travers d'un échangeur thermique afin de tirer tout bénéfice supplémentaire de l'air sortant. L'air frais, arrive ensuite dans l'espace commun de l'immeuble. La cage d'escalier forme en réalité un grand accumulateur thermique, où l'air est entreposé, avant d'être insufflé dans les appartements. Dans ce grand volume de stockage construit en éco-béton, qui se veut être un filtre supplémentaire en absor-

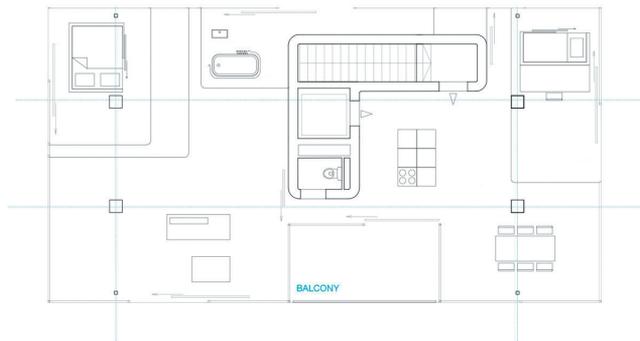
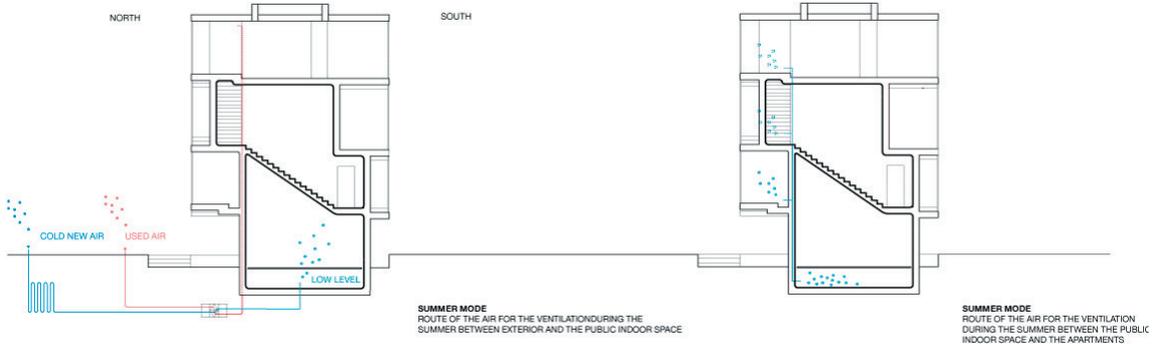
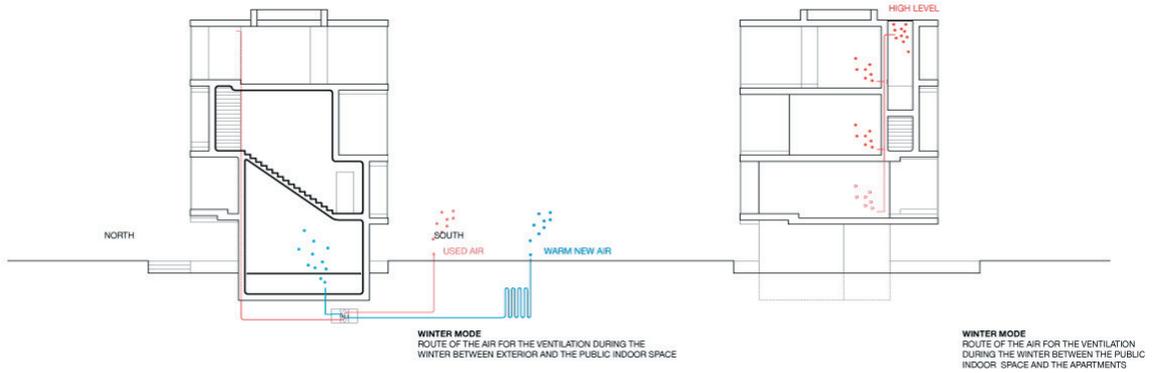


fig. 64 : flux d'air en hiver

bant le CO₂ et autres polluants, l'air peut venir s'y répartir naturellement par strates, selon un gradient thermique. L'air chaud monte sous le plafond du troisième étage et l'air froid reste en bas au rez-de-chaussée. On peut également s'imaginer, que le béton joue un rôle important comme régulateur avec son inertie thermique importante. Ici aussi, selon la saison et autres paramètres, l'air pour les appartements peut être prélevé en deux points différents du volume de stockage. En bas l'air sera naturellement frais au travers de l'échange thermique avec le sol. C'est la solution à privilégier en été par temps chaud. L'air en haut du volume est plus chaud. Au travers d'une fenêtre zénithale, le rayonnement solaire peut encore élever la température si le besoin s'en fait sentir. C'est la solution à privilégier en hiver par temps froid.

fig. 65 : flux d'air en été

C'est un système informatique qui, au travers de l'installation de différents capteurs thermiques à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, décide qu'elles prises d'air sont les plus favorables à utiliser pour ventiler l'intérieur des appartements. Il peut choisir pour la prise d'air extérieure entre celle au nord, à l'ombre, et celle au sud, au soleil. Une fois dans l'accumulateur thermique, le système peut choisir de faire entrer l'air en haut, plus chaud, ou celui en bas, plus frais.

Une fois l'air frais dans les logements, l'air vicié est extrait par une ventilation mécanique, où sa chaleur ou fraîcheur est revalorisée dans un échangeur thermique pour l'air frais entrant.

Le projet prévoit pour se protéger des déperditions thermiques en hiver du triple vitrage avec une valeur U de 0.6 W/m²·K. Les rideaux à l'intérieur ont pour rôle de couper la radiation nocturne et les regards non-désirés. Des voiles plus légers dans l'appartement permettent plus d'intimité.

Le mobilier fixe est conçu comme des boîtes en bois prévus pour réguler l'humidité des pièces^[4].

En été, les façades vitrées sont protégées par des protections solaires variables, évitant ainsi les excès de chaleur.

critique et opinion personnel

fig. 66 : plan d'étage

Le projet soulève de nombreux sujets intéressants, raison pour laquelle j'ai choisi de le présenter. Philippe Rahm est un des rares architectes, qui questionne sérieusement la place des échanges thermiques dans l'architecture. Il remet ici en question la place de l'air et de la lumière dans l'habitat contemporain. Il inverse le traditionnel dessin du vide et du plein de l'architecte : plutôt que l'air vienne s'engouffrer dans le vide résultant du dessin des pleins, l'air dessine lui-même son espace, dont les pleins en sont la résultante. La stratification thermique devient un vecteur spatial. Mais elle montre également une nouvelle manière de concevoir et d'habiter les espaces.

Le chemin que parcourt l'air avant de parvenir dans les logements séduit par les détails qui lui sont apportés, malgré une certaine complexité. La volonté du contrôle dans les moindres détails a probablement laissé peu

[4] présent dans le descriptif du projet, mais j'ai mes doutes sur la réelle efficacité du dispositif.



de place à une ventilation strictement naturelle, qui puisse se passer de ventilateurs et capteurs thermiques. L'utilisation intelligente du puits climatique avec des prises d'air différenciées et la stratification thermique dans les espaces communs, utilisés comme accumulateur thermique vertical, sont particulièrement intéressants. Cela démontre bien les combinaisons sans limite que les différentes stratégies climatiques peuvent avoir entre elles.

Le projet resté au stade d'avant projet, laisse cependant ressentir d'autres questions quand on le regarde dans son ensemble.

C'est tout d'abord l'aspect extérieur du bâtiment qui interpelle. Certes, les différents niveaux de dalles sont sources de questionnement et montre une originalité certaine, bien que difficile à réaliser et pas vraiment optimal en terme structurel et d'économie de la matière. Le parti pris d'envelopper toutes les façades d'un rideau de verre semble également surprenant, connaissant les déperditions thermiques, malgré un triple vitrage, que cela engendrerait. Un mur opaque avec une valeur U de $0.2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, offrirait une bien meilleure isolation ainsi qu'une économie d'énergie pour la fabrication importante.

L'intégration des protections solaire semble également ne pas avoir été au cœur des préoccupations, car mis à part dans la description du projet, elles ne sont pas visibles dans les dessins.

En réalité, c'est probablement le manque de contexte du projet qui fait surgir ces questions. Mais plutôt que de considérer les appartements convectifs comme un projet pour Hambourg, nous pourrions les considérer comme une étude fictive, destinée à montrer les potentialités d'une réflexion différente.

fig. 67 : vue extérieure



lieu : Cenon, France

date : 2020

programme : îlot de fraîcheur multimodal

nature du projet : nouvelle installation en lieu existant

réalisation : réalisation

architecte :

maître de l'ouvrage :

coûts des travaux :

partenaires :

l'Eau Bordeaux métropole,
Agence de l'Eau Adour Garonne,
SUEZ le LyRE,
E6-consulting
Atelier Colin & Poli Paysages

matériaux : bois, tissus et végétation

stratégies climatiques :

protection solaire

évaporation de l'eau par brumisation

évapotranspiration de la végétation

résultats espérés :

création d'un îlot de fraîcheur urbain économe en eau

ILOT DE FRAÎCHEUR URBAIN

VISION

L'EAU DE BORDEAUX ET LYRE

fig. 68 :
allée végétalisée et
kiosque brumisant du
projet VISION

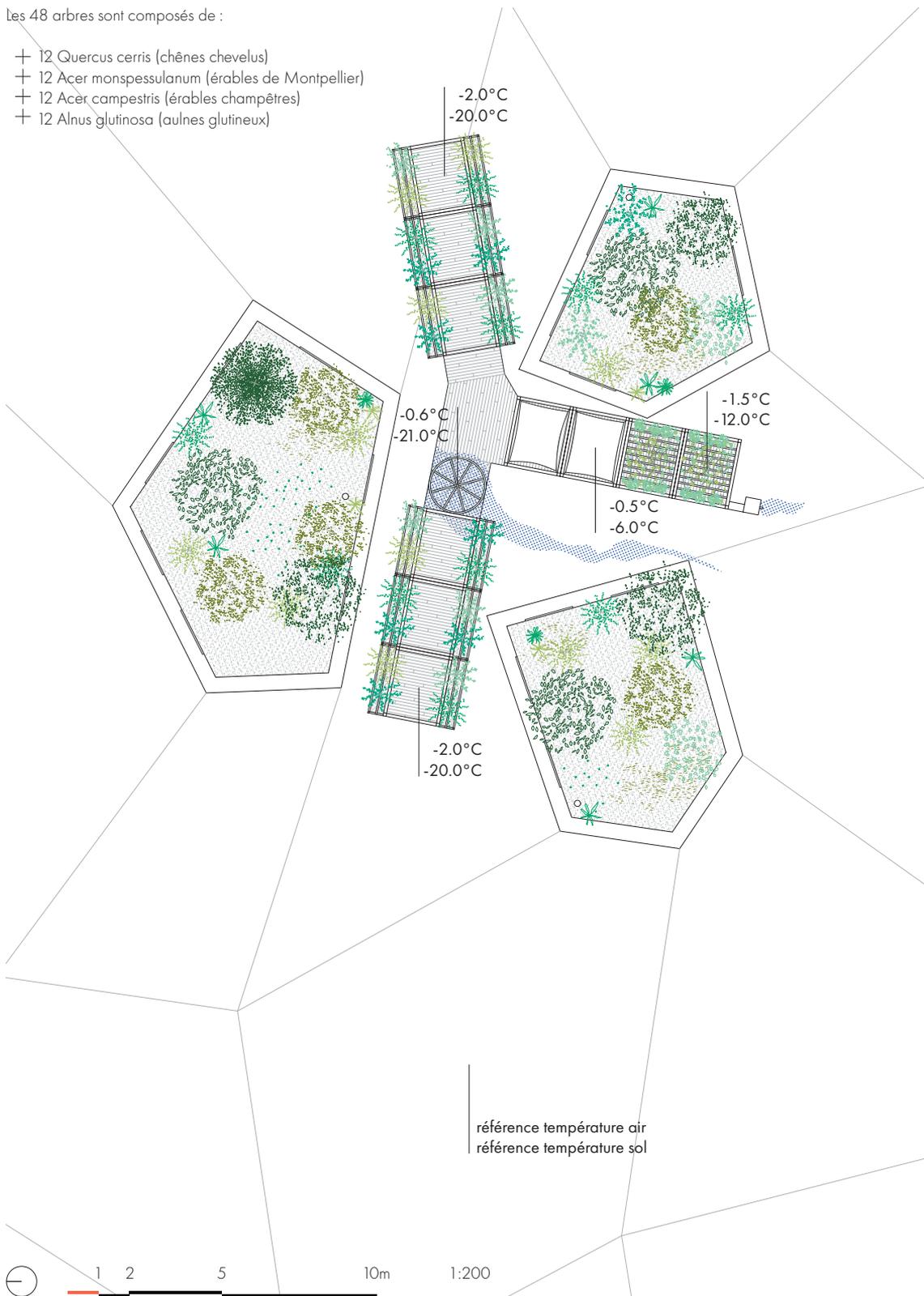
Le projet Vision installé à Cenon en métropole bordelaise est une réaction directe face à l'effet des îlots de chaleur urbain. L'installation modulaire cherche à apporter une solution de rafraîchissement dans le cadre d'une place particulièrement minérale, tout en associant économie d'eau, durabilité environnementale, et confort des habitants. L'efficacité des voiles d'ombrage, de la végétation et des brumisateurs se fait ressentir au travers d'une réduction de la température de l'air à l'intérieur du dispositif de 2°C et des températures de surface de 20°C. L'installation n'en devient pas seulement un réel îlot de fraîcheur urbain, mais également un lieu de rassemblement collectif à la recherche d'une même sensation; la fraîcheur par temps de canicule. En réalité, elle rend à l'espace public ce qui le définissait : son public.

Ce projet fait partie d'une analyse et expérimentation plus large menée principalement par Eau de Bordeaux Métropole et Le LyRE, le centre de recherche et d'innovation de SUEZ. Celle-ci vise à apporter aux collectivités des solutions de rafraîchissement économes en eau, environnementalement durable, et répondant aux attentes des citoyens, dans un but de lutte contre les îlots de chaleur urbains.

L'îlot de chaleur urbain, souvent abrégé par ICU, se caractérise par une température en ville plus élevée que dans les zones rurales alentours moins urbanisées. Cela provient principalement d'une présence importante de surfaces minéralisées qui absorbent la chaleur et de la morphologie de la

Les 48 arbres sont composés de :

- + 12 *Quercus cerris* (chênes chevelus)
- + 12 *Acer monspessulanum* (érables de Montpellier)
- + 12 *Acer campestre* (érables champêtres)
- + 12 *Alnus glutinosa* (aulnes glutineux)



ville. La différence de température est surtout perceptible pendant la nuit. Il se crée une sorte de bulle de chaleur sur la ville.

description

Le site choisi pour cette expérience, est situé sur la place François Mitterrand à Cenon en métropole bordelaise, au milieu d'un quartier de grands immeubles. Elle a été identifiée comme îlot de chaleur urbain, dont la raison est son caractère très minéral et sans ombrage. Rénovée en 2018, la place possède seulement trois petits terre-plein végétalisés d'une quinzaine de mètres carré chacun, contre 6'000m² pour la place entière. En été, malgré le marché hebdomadaire qui s'y tient, cet espace public était déserté par les habitants du quartier car la température insoutenable ne permettait pas de s'y arrêter.

La réponse apportée par le groupe de travail est une installation de 150m², jouant sur les effets d'ombrages, d'espaces végétalisés et de brumisateurs, afin de rafraîchir l'air à l'intérieur du dispositif et de pouvoir mesurer et évaluer la contribution de chaque élément dans son ensemble. Il en résulte un îlot de fraîcheur multimodal, économe en eau et fonctionnant sans énergie, qui permet de faire baisser la température de l'air par temps de canicule.

L'installation est composée de 11 modules en bois qui s'appuient sur les trois îlots végétalisés existants. Dans ce cas ci, une fontaine publique à boire déjà présente complète le dispositif et permet une alimentation en eau potable des brumisateurs^[5].

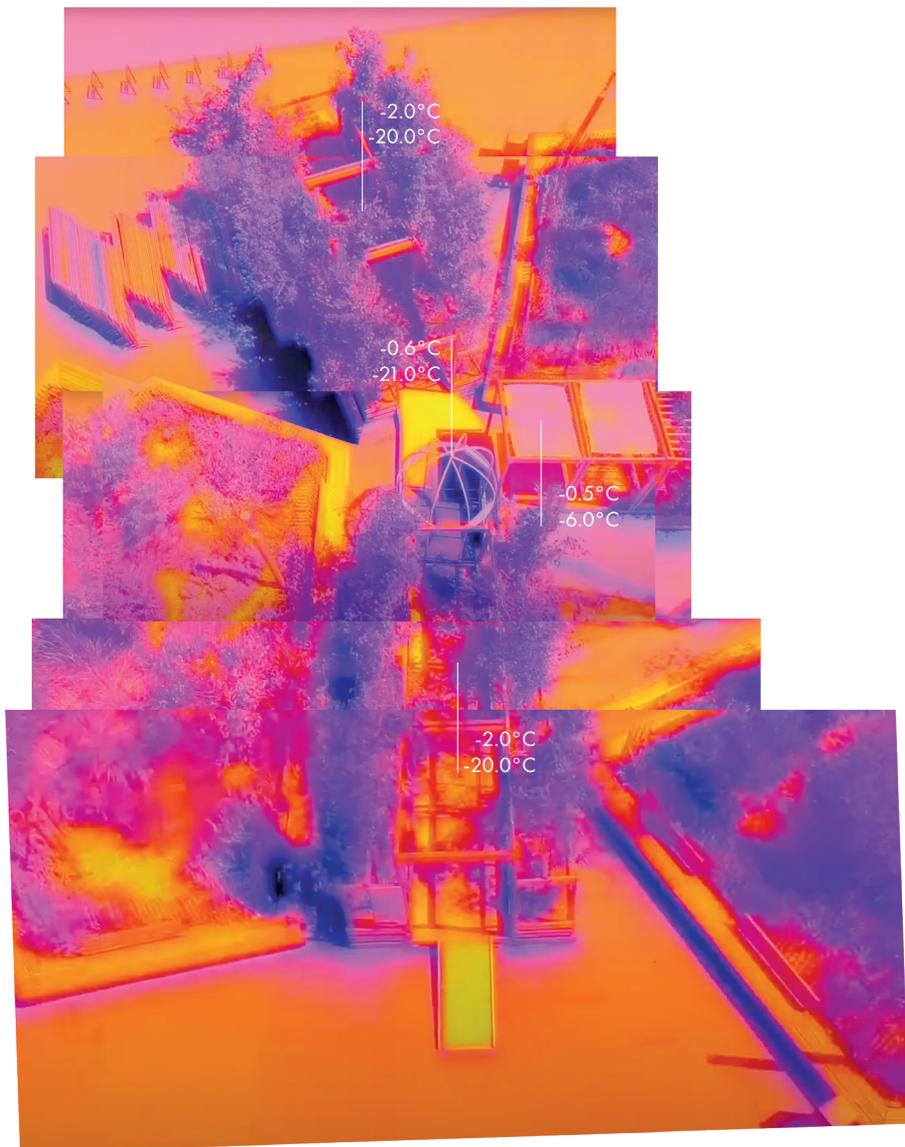
Au centre se trouve un kiosque brumisant qui a la particularité de ne nécessiter aucun apport d'énergie externe pour fonctionner. La seule pression de l'eau du réseau suffit, avec une amplitude de fonctionnement comprise entre 1.5 et 3.0 bars.

Le kiosque central trouve sa place au milieu de trois allées, dont deux corridors végétalisés. Ces allées sont constitués de divers modules en bois et lames de résine minérale recyclée pour le sol. Les corridors végétalisés possèdent de chaque côté des jauges de 735 litres dans lesquelles s'insèrent les arbres en pot. Le nombre d'arbres dans les jauges varie afin de pouvoir évaluer l'impact qu'a la densité de végétation dans ces conditions. Quatre essences d'arbres différentes ont été retenues, choisies pour leur capacité à résister aux épisodes de forte chaleur dans un milieu minéralisé, résister à un apport d'eau important pour les arbres proches des brumisateurs et apporter un ombrage conséquent dans le cadre de l'expérience. Ce sont des arbres matures dont le feuillage est déjà dense. Ils sont alimentés par un système de goutte à goutte piloté par un programme d'arrosage de l'ordre de 24l/arbre/jour.

La troisième allée connecte l'ensemble du dispositif à la fontaine existante. Les modules constituant cette allée supportent soit une simple voile d'ombrage en guise de toiture, soit une pergola recouverte de plantes grim-

fig. 69 :
plan de l'aménagement

[5] en France, la loi oblige les brumisateurs d'être alimentés en eau potable. Il est interdit d'utiliser de l'eau recyclée même si elle est traitée.



pantes (consommation d'eau de 4l/jour/plante).

parcours de l'air

Le but de cette installation est d'offrir des parcours multiple à l'utilisateur, tout comme à l'air, afin de pouvoir s'imprégner des différentes sensation que le projet peut offrir, ainsi que d'évaluer les différentes solutions mises en place au travers d'un monitoring.

L'air autour de l'installation est particulièrement chaud en été. Les rayons du soleil sont absorbés par le contexte environnant minéral. Le rayonnement de la chaleur emmagasinée s'opère encore bien après le coucher du soleil. La température au milieu de la place découverte est utilisée comme température de référence pour mesurer l'efficacité du dispositif. C'est cet air brûlant et étouffant qui cherche à être revalorisé dans cette oasis végétale. Il n'est ici pas question de favoriser des courants d'air en particulier, mais plutôt d'influencer la température et l'hygrométrie de l'air déjà présent.

L'air du premier module développe une première sensation de fraîcheur. La chaleur rayonnée par le sol de la place ne s'y fait plus ressentir. Le léger ombrage de la pergola végétalisée aide à supporter le soleil et l'évapotranspiration des feuilles de jasmin réduit la température de l'air. En effet, une réduction de la température ambiante d'environ 1.5°C a été relevée. La température du sol y est également plus basse d'environ 12°C par rapport à la place. L'air présent dans le deuxième module de l'allée ne délivre malheureusement pas la même sensation de fraîcheur. Son simple ombrage procuré par une voile tendue n'a pour effet qu'une faible réduction des températures de 0.5°C pour l'air ambiant et de 6°C pour le sol.

Les deux autres allées du projet sont quant à elles fortement végétalisées. L'air, à l'ombre naturelle des arbres, y délivre une atmosphère particulièrement agréable. Outre leur apport en ombre, les chênes, érables et aulnes plantés rafraîchissent l'air grâce à la photosynthèse. Leurs feuilles sécrètent de l'eau au travers des stomates qui, en s'évaporant, fait baisser la température de l'air^[6].

Mais l'œil est attiré par un élément en particulier de cet ensemble. Tel un kiosque à musique vers lequel convergent les promenades du jardin du Luxembourg, c'est ici un kiosque brumisant qui est au centre de l'attention. Il forme comme une sculpture que l'on traverse de son corps entier et projette dans l'air un nuage de fines gouttelettes qui s'évaporent quasiment instantanément. Bien que son effet direct sur la température de l'air ne soit que faible (une chute de 0.5°C), son attrait réside plutôt dans la fraîcheur procurée par la brumisation elle-même sur la peau. À l'image de l'évapotranspiration des feuilles d'un arbre, c'est le changement de phase de l'eau en vapeur d'eau directement sur la peau qui délivre une réelle sensation de fraîcheur. La brumisation a lieu par bouton poussoir pendant une plage horaire prédéterminée.

La réelle force de fraîcheur du projet se trouve dans la combinaison de l'ombrage généré par les arbres des allées arborées et la pellicule d'eau

fig. 70 :
image thermique de
l'aménagement

image reconstituée à partir d'ex-
traits vidéos :

© E6 Consulting

[6] voir thème « rafraîchissement par évapotranspiration »

déposée après actionnement du kiosque brumisant. Cela permet une chute de la température du sol d'environ 20°C par rapport à un sol minéral nu, et une chute de 2°C de la température ambiante.

Un rapport effectué par SUEZ y indique : « Les mesures ont été réalisées grâce à des capteurs, des caméras thermiques, et des enregistreurs de température, couplés à des prises de vues infrarouge au drone. L'objectif est de mesurer la température de surface ainsi que la température ambiante. Les consommations d'eau ont également été suivies et une ACV (Analyse du Cycle de Vie) a été réalisée, afin d'analyser l'impact environnemental de l'îlot de fraîcheur. Une Réduction jusqu'à 20°C des températures de surface au pied de l'IFU a été mesurée et de 2°C de la température ambiante à l'intérieur du dispositif.^[7] »

Mais l'étude va plus loin en recueillant également le ressenti des habitants du quartier. Selon SUEZ, l'îlot de fraîcheur urbain a suscité beaucoup d'enthousiasme, de manière immédiate et spontanée. Les solutions employées sont perçues comme un vecteur d'embellissement de la place, qui gagne ainsi en confort. Elle devient ainsi un lieu de rencontre multigénérationnel et plus seulement un lieu de passage.

L'intérêt de cette étude réside dans son efficacité et son impact social. Rares sont les projets qui bénéficient d'un tel suivi de performances à la fois sur le plan scientifique mais aussi sur le plan social, ce qui en permet une analyse et compréhension approfondie.

La nécessité pour les villes de trouver des solutions de rafraîchissement à l'échelle urbaine se faisait ressentir. Ce n'est pas seulement l'apparition du terme *îlot de chaleur urbain* dans tout article pointant du doigt la responsabilité des villes en période de canicule. C'est pour les villes aussi une façon de contrer les phénomènes de *streetpooling*^[8] grandissants pendant les périodes de forte chaleur.

L'emploi de ces modules préfabriqués apportent une première réponse. Ils ont l'avantage de pouvoir être rapidement installés et ne nécessitent pas de fondations particulières. Ils peuvent être facilement installés dans l'espace public et être déplacés, ce qui en fait une solution idéale quand une intégration définitive dans le sol de la ville n'est pas possible. Cela en fait une solution particulièrement intéressante pour les collectivités. L'emploi de telles solutions modulables laisse cependant ressentir un manque d'intégration dans l'esthétique global de l'ensemble. Des entreprises spécialisées telle que TinyPark travaillent sur une offre élargie de modules à assembler, dont les combinaisons seraient multiples. Il ne faut toutefois pas oublier qu'un tel dispositif doit être conçu en lien avec les usages et adapté au rythme des

le monitoring

critique et opinion
personnel

[7] « Le LyRE fait baisser la température d'un îlot de chaleur urbain à Cenon (33) », SUEZ [en ligne], [consulté le janv. 13, 2022].

[8] détournement illégal de l'usage des bouches à incendie en pleine rue.

espaces où il est installé. Il peut ainsi prendre toute sorte de forme, tel une zone d'attente pour les transports en commun ou devant un commerce. La petite échelle du dispositif rend les résultats obtenus impressionnants. Sur simplement 150m², il est possible d'obtenir des écarts de température de 20°C pour les surfaces au sol et 2°C pour la température de l'air. Il est mentionné dans le rapport que un « îlot de fraîcheur de ce type n'aura pas d'effet rafraîchissant en dehors de sa zone d'influence directe et n'a pas vocation à en faire un site d'attraction plus large^[9] ». Mais ceci ne laisse qu'entrevoir les possibilités réjouissantes que ce genre d'aménagements pourraient avoir dans un espace public à plus grande échelle. L'effet de rafraîchissement pourrait en dépasser ses simples limites physiques^[10].

Mais en prenant du recul, ce type d'aménagement n'a rien de nouveau. Il reprend le même rôle des places bordées de platanes qu'on retrouve encore dans certains villages au sud de la France. Ces grands arbres parfois centenaires forment une grande canopée qui jette de l'ombre toute la journée sur la place au sol perméable. Ils laissent bénéficier les usagers de l'évapotranspiration pour laisser libre cours aux activités de la communauté. Seul le caractère d'intervention urgent différencie les grands et vieux platanes d'un îlot de fraîcheur modulaire. Car au final, ce type d'aménagement n'est qu'un bosquet végétal boosté au brumisateur.

C'est pour cela qu'il ne faut pas percevoir cet aménagement comme une solution en soit, mais bien comme une expérience qui permet de confirmer des suppositions au travers de mesures scientifiques. Nous l'avons vu, la combinaison de plusieurs phénomènes rend le rafraîchissement particulièrement efficace. Il est maintenant temps de voir les choses en grand.

[9] « Vision - quelles solutions de rafraîchissement basées sur l'eau en ville? », document de synthèse, 2020.

[10] voir S. Coccolo, « Urban greening », Lausanne, 2021.

CONCLUSION



CONCLUSION

L'ARCHITECTURE DOIT RENOUER AVEC LE CLIMAT

« Nous pouvons réveiller l'ambition des concepteurs et saisir cette crise comme une opportunité de s'affranchir des paradigmes créatifs et sociaux existants. [...] Pour se développer, la culture du bâti ne peut être dissociée du contexte social^[1] », Jakob Schneider.

Nous l'avons vu, l'architecture a pour finalité de rendre artificiellement habitable un lieu hostile et ce, depuis les premières constructions de l'homme. Habiter dans un climat inadapté n'a en réalité rien de nouveau. Le changement climatique n'est qu'un nouveau climat parmi d'autres, mais c'est peut être bien celui qui affectera le plus grand nombre d'entre nous. L'augmentation des températures globales, le changement des régimes de précipitations, l'intensification des événements extrêmes; voilà la réalité de ce qui nous attend. Il est aujourd'hui impossible de prédire avec précision l'avenir. Mais il est possible d'extrapoler des tendances à travers divers scénarios climatiques, basés sur différents modes d'émissions de CO₂ de l'homme^[2]. Ce sont donc les hommes, c'est à dire vous et moi, qui influençons directement notre avenir climatique.

Notre mode de vie au quotidien, les services publics, l'industrie et l'agricul, le commerce, les transports et le secteur du bâtiment ; tous émettent des gaz à effet de serre. C'est leur concentration trop importante dans l'atmosphère qui a pour conséquence l'augmentation des températures par effet de serre. L'architecture, est une source considérable de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂, générant près de 24.2% des émissions globales

[1] V. Felber, « «Se contenter de demi-mesures ne suffira pas» », Espazium [en ligne], 24 novembre 2021. [consulté le janv. 10, 2022].

[2] dans notre cas les scénarios d'émission RCP2.6 et RCP8.5

de CO₂ pour la Suisse^[3]. La responsabilité des architectes et urbanistes est énorme. Un quart du problème climatique se trouve entre leurs mains. Mais nous avons compris, que réduire les émissions de CO₂ n'était pas la seule chose à faire. Il est trop tard pour que ces réductions puissent avoir une action immédiate sur le changement climatique, dont les conséquences sont déjà perceptibles aujourd'hui. Il faut en parallèle développer des stratégies d'adaptation de notre environnement naturel et bâti.

L'architecture n'a d'autre choix que de se réinventer. Elle doit répondre à de nouvelles exigences et de nouveaux besoins. D'ailleurs, la conscience des architectes commence à s'éveiller, comme en témoigne les quelques exemples étudiés. J'espère qu'à ce stade là de la lecture, vous aussi êtes conscient du contexte dans lequel nous allons devoir évoluer. Mais il n'y a pas de craintes à avoir, car il n'y a rien que l'architecture ne saura surmonter.

La surchauffe des espaces intérieurs présente un risque réel. L'augmentation drastique des températures globales et extrêmes à l'avenir en témoigne. La climatisation, à cause de son importante consommation électrique, n'est pas une solution durable. En défiant toute influence des températures extérieures, elle remet en cause notre relation avec le climat. Or nous avons appris du passé, et savons que nous devons habiter avec le climat, et non contre celui-ci.

La réponse à la question se trouve ici : pour minimiser les impacts du changement climatique et adapter notre environnement à un futur incertain il faut renouer avec le climat.

Renouer avec le climat implique la compréhension de celui-ci. S'en inspirer pour nos constructions, c'est aussi apprendre à vivre avec. Car la conception bioclimatique est au final la conception d'espaces selon des principes météorologiques. Elle est cette part de l'atmosphère terrestre que l'on enferme sous un dôme et sur laquelle on cherche le contrôle de ses caractéristiques physiques. On y pense en terme de flux d'air, de surface de captage, de volume de stockage, de gradient thermique et autres, plutôt qu'à des principes strictement géométriques. La thermodynamique des fluides permet à l'architecte de résoudre des problèmes d'ordre tant spatial que climatique, « d'inventer des formes selon les logiques météorologiques plutôt que plastiques^[4] ». Tirer profit des phénomènes climatiques pour rendre un lieu habitable, tout en diminuant la consommation d'énergie, c'est créer une architecture bioclimatique et durable. L'architecte devient ainsi, parfois sans

les espaces comme micro-climats

[3] voir thème « émissions de gaz à effet de serre - contexte suisse

[4] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.281.

s'en rendre compte, le créateur d'un micro-climat intérieur.

Les principaux mécanismes de la ventilation passive et de la gestion thermique de rafraîchissement vous sont désormais connus. La stratification thermique, le rafraîchissement nocturne par convection ou radiation, le rafraîchissement adiabatique ou l'évapotranspiration, voilà des termes dont le mystère est maintenant levé. Ce sont en premier lieu des phénomènes climatiques, mais ce sont aussi des outils architecturaux forts et puissants pour la conception intelligente des espaces, qu'ils soient intérieurs ou extérieurs. L'air n'est jamais statique et son flux est difficile à appréhender. Mais s'exercer à imaginer le parcours de l'air^[5] plutôt que l'habituel parcours de l'utilisateur aide à changer notre vision traditionnelle des espaces, construits pour de simples raisons programmatiques et plastiques.

deux façons d'être vrai

Le résultat final d'un projet architectural n'est pas qu'un simple assemblage de diverses formes géométriques pour former un toit et quatre murs. Mais bien plus une composition sensible, fruit d'un long travail d'analyse, de choix et compromis. Ainsi, Eugène Viollet-Le-Duc mentionne: « En architecture, il y a, si je puis m'exprimer ainsi, deux façons nécessaire d'être vrai. Il faut être vrai selon le programme, vrai selon les procédés de construction. Être vrai selon le programme, c'est remplir exactement, scrupuleusement, les conditions imposées par un besoin. Être vrai selon les procédés de construction, c'est employer les matériaux suivant leur qualités et leurs propriétés^[6] ».

Être vrai selon les programmes est le fondement de l'architecture, puisque c'est la réponse à un cahier des charges, ou plus largement, c'est offrir un abri avec un certain confort à l'homme. Être vrai selon les principes de construction, c'est rendre visible les matériaux bruts porteurs, qui donnent ainsi l'expression visuelle du bâtiment. Mais pendant la période moderne, la valeur constructive a eu tendance à être mise de côté, au profit d'une valeur plutôt esthétique. Philippe Rahm en déduit entre autre, que « Pour les architectes de la modernité des années 1920-1930, la valeur sanitaire de l'architecture prend le dessus sur sa valeur constructive, transformant les principes esthétiques : ce qui est beau est ce qui est sain^[7] ».

Et si la conception d'espaces selon des principes météorologiques permettait de renouer avec ces deux valeurs?

notre imagination pour seule limite

Les possibilités de formes, de disposition et de choix de matériaux sont multiples. Les architectes et urbanistes n'ont pour limite que leur imagination. Ils leur est possible de dessiner des plans d'appartement qui tire le meilleur parti de deux extrêmes thermiques grâce à la stratification thermique. Ils dessinent de nouveaux mode de vie qui permettent d'éviter le gaspillage par convection de la chaleur. L'espace chaud en haut peut être utilisé lors-

[5] cf. cas d'étude

[6] E. Viollet-Le-Duc, « Entretiens sur l'architecture », t. II, dixième entretien, A. Morel et Cie., Paris, 1863.

[7] P. Rahm, « Histoire naturelle de l'architecture », Paris, 2020, p.217.

qu'on est le moins vêtu telle la salle de bain. À l'autre extrême, en bas où l'air est le plus froid, une utilisation de l'espace pour des activités plus intenses ou de repos peuvent être envisagés.

Ils peuvent dessiner des stockages thermiques qui absorbent les gains solaires inévitables en été. Il serait possible d'exposer une grande masse au ciel froid de la nuit et de la ramener à l'intérieur en journée pour surmonter les heures les plus chaudes, tel un glaçon dans un verre d'eau. Que cette masse mobile prennent la forme d'un mur pivotant, d'une sphère roulante ou de volume d'eau dans un bassin, le choix est laissé au concepteur du bâtiment.

Il peut aussi influencer le parcours de l'air avant qu'il n'atteigne l'espace souhaité. L'air peut être contraint à un échange thermique avec le sol, ou bien passer au dessus d'un plan d'eau pour se charger en humidité et se refroidir. Il peut au contraire être particulièrement chauffé grâce au soleil sur un point haut de sorte à créer un effet de cheminée et ainsi une ventilation efficace même sans vent.

Il apparaît une nécessité des bâtiments de s'adapter à l'environnement. L'efficacité des bâtiments en dépend et tout comme la végétation s'adapte aux phases hivernales et estivales, les bâtiments, avec une conception adéquate peuvent le faire aussi. Ainsi il n'est plus possible d'avoir des bâtiments qui fonctionnent été comme hiver de la même manière. Le caractère statique connu aujourd'hui, doit évoluer vers un bâtiment dynamique, qui s'adapte en fonction des conditions extérieures et des besoins de ses occupants. Exploiter au mieux ce que le climat a à nous offrir et transposer cela dans un nouveau langage architectural, plein de dynamisme, qui met en exergue le vrai fonctionnement d'un bâtiment, n'est-ce pas séduisant?

Mais une notion particulièrement difficile à implémenter est probablement le lien direct entre l'environnement thermique que l'architecte conçoit avec ses paramètres associé, et l'utilisateur d'un espace. Impliquer l'utilisateur dans son environnement thermique, lui faire prendre conscience que 21 °C par tout temps et ce toute l'année n'est pas une chose acquise, c'est rendre l'utilisateur acteur de son propre bien être. Pour cela, les solutions mises en place doivent être simples, appréhensibles par tous, afin qu'elles forment un système basé sur la résilience. Chaque être humain est responsable d'une partie des émissions de CO₂ totales. Être conscient de l'influence que notre mode de vie a sur la planète est primordial pour combattre efficacement le changement climatique. Car chaque décision que nous prenons aujourd'hui a un impact sur notre avenir.

La mise en place de solutions de ventilation et de rafraîchissement ne se fait pas seulement à l'échelle d'un bâtiment. Les cas d'étude le prouvent bien : toutes les échelles d'action sont à considérer, que ce soit au niveau d'une pièce, d'un logement, d'un bâtiment et de ses abords, voire même d'une ville entière. La création d'îlots de fraîcheur urbains nécessite une ap-

l'utilisateur acteur de son propre bien-être

le réchauffement climatique peut-il revaloriser l'espace public?

proche à plusieurs échelles. L'effet bénéfique que peut avoir l'évaporation de l'eau et la végétation ne connaît pas les limites cadastrales d'une ville, alors pourquoi ne pas en faire profiter plus de monde?

Chaque intervention architecturale est indissociable d'une dimension humaine et sociale, puisqu'elle modifie l'habitat de ses occupants. Elle est une composition majeure de la structuration spatiale de nos villes. La densité et la morphologie des volumes construits varient avec les contraintes extérieures, la nécessité de nous regrouper ou de nous déplacer. L'espace public doit offrir une réponse à des problèmes actuels, mais aussi futurs. La pure valeur esthétique d'une place se voit aujourd'hui déclassée par les canicules et le manque de fraîcheur dans les villes. Ce sont aujourd'hui des caractéristiques climatiques précises qui définissent la qualité d'un espace public et par là, l'intérêt de s'y regrouper.

socialisme thermique

La création d'îlots de fraîcheur urbains forment une réponse efficace face à l'augmentation des températures en milieu bâti. Ils ravivent la notion de *socialisme thermique*, terme employé par le philosophe Peter Sloterdijk. Bien qu'à l'origine ce terme désignait le rassemblement de personnes autour d'une source de chaleur commune, il est également vrai pour le rassemblement de ces mêmes personnes autour d'une source de fraîcheur commune. Le modèle de rafraîchissement individuel par climatiseurs n'est plus possible. La mise en commun de ressources de chaleur comme de fraîcheur forme un acte de durabilité fort, d'économies financière et énergétique, ainsi qu'une occasion inespérée de renforcer les liens d'une communauté. Le changement climatique met ainsi en exergue une réelle nécessité de revoir nos manières de vivre ensemble.

in fine.

En effet, l'humain semble être en crise. Crise climatique certes, mais aussi en crise sociale. Mais chaque crise a ses solutions. Que ce soit aujourd'hui, demain ou après-demain, l'architecture trouvera tôt ou tard sa forme adéquate, tout comme elle a su le faire depuis les temps de la cabane primitive. La discipline continuera son évolution, comme un mouvement perpétuel, pour faire face aux nouvelles crises d'une génération future. Mais si il y a bien une chose que l'architecture ne doit jamais perdre de vue, c'est l'importance de son environnement, qu'il soit naturel ou humain. Car comme le rappelle Karl Marx, «l'homme est soumis aux mêmes lois que la nature^[8] ».

[8] K. Marx, Critique de la critique critique (1845). Paris: Gallimard, 1982.

HABITER L'INCERTAIN



HABITER L'INCERTAIN

LAUSANNE

Habiter l'incertain est la suite logique de concevoir l'incertain. L'incertain, c'est un scénario climatique à l'horizon 2060 pour le Canton de Vaud, ou plus précisément Lausanne. Il traduit les conséquences que le dérèglement climatique induit par l'homme pourrait avoir en ce lieu. Car Lausanne, malgré son cadre idyllique entre lac et montagnes, n'est pas à l'abri de ces changements. La ville doit réagir, afin de s'adapter aujourd'hui à un avenir qui s'annonce tumultueux.

La région lausannoise est une région dynamique, en pleine expansion. De nouveaux quartiers se construisent, des emplois se créent, des personnes emménagent; Lausanne assume pleinement son rôle de capitale vaudoise. Elle devient le terrain de jeu parfait pour tout architecte cherchant à exprimer sa vision d'avenir.

Lausanne ne possède pas seulement un cadre de vie plaisant. C'est également une ville qui possède de réelles ambitions climatiques. Les mesures entreprises ne sont peut-être pas au goût de tout le monde, mais Lausanne est l'une des premières villes à avoir étudié ses modes de vie et de consommation afin de proposer un plan climat tangible. Il affirme la volonté de la ville de devenir un acteur majeur dans la lutte contre le changement climatique.

Mais c'est également la dimension personnelle qui m'a poussé à choisir Lausanne comme lieu d'expérience d'une architecture nouvelle. Lausanne m'a séduit par son caractère complexe et simple à la fois, tant par sa configuration spatiale que son mode de vie. Les innombrables côtes parcourues à vélo et les nombreux souvenirs divers et variés y étant rattachés motivent mon implication dans ce cadre qui m'est cher.

le jour le plus chaud sera de

36.1°C

entre 1981-2010 il était de 32.6°C,
une augmentation entre +1.8 et +6.1°C
est à prévoir



plus fortes précipitations en un

jour d'hiver seront de 26mm

entre 1981-2010 elle était à 22.9mm, soit
une augmentation entre -0.8 et +18.3%

le nombre de jours

tropicaux sera de 22 jours

entre 1981-2010 il y avait 7 jours,
une augmentation entre +15 et +19
jours est à prévoir



nuit la plus froide de

l'année sera à -7.9°C

entre 1981-2010 elle était à -12°C,
une augmentation entre +2.8 à
+5.6°C est à prévoir

la plus longue période de
sécheresse estivale durera 18 jours

entre 1981-2010 elle durait 14 jours,
une augmentation entre +0 à +8.6 jours est à
prévoir



le nombre de jours de neige

fraîche sera de 2 jours

entre 1981-2010 il était à 8,
une diminution entre -3 à -8 jours est à
prévoir

HABITER L'INCERTAIN

UN SCÉNARIO CLIMATIQUE POUR LAUSANNE

Lausanne et le Canton de Vaud pourraient ne pas avoir la même idylle qu'ils connaissent aujourd'hui. Tout comme pour le reste de la Suisse, les températures augmenteront sensiblement en été et en hiver. Les précipitations auront tendance à augmenter en hiver, tandis que les étés se feront plus secs.

fig. 71 : changements attendus dans le canton de Vaud pour la période autour de 2060

Le constat actuel du réchauffement climatique montre que l'objectif de limiter le réchauffement climatique à +2°C est de plus en plus difficile à atteindre. C'est pour ça qu'émettre un *worst case* scénario (RCP8.5) pour le milieu du siècle (environ 2060) pour le canton de Vaud ne semble pas dérisoire.

Ainsi, nous pourrions nous attendre à une augmentation de la température moyenne de +2.3°C d'ici le milieu du siècle par rapport à l'état actuel. Cette hausse des températures ainsi que les changements du régime de précipitation affecteront les événements extrêmes. La période de sécheresse estivale la plus longue pourra durer 18 jours consécutifs. Les températures extrêmes en été pourront subir un réchauffement allant de +1.8°C à +6.1°C. Ainsi, il ne sera pas étonnant d'avoir des journées en été dépassant les 36°C. On pourra compter pas moins de 22 jours dans l'année, lors desquels la température dépassera les 30°C.

Les précipitations fortes et extrêmes s'intensifieront également, allant jusqu'à +18.3%. Les plus fortes précipitations en un jour d'hiver pourront atteindre les 26mm. Les vagues de froid se verront moins nombreuses, car les températures hivernales extrêmes se réchaufferont de +2.8 à +5.6°C par rapport à aujourd'hui^[1]. Rares seront les jours de neige en plaine.

hypothèse : scénario d'émission RCP8.5
période de référence :
1981 - 2010

données :
NCCS, «Changement climatiques dans le canton de Vaud »,
2021, Zürich.

[1] NCCS, « Changement climatiques dans le canton de Vaud », Zürich, 2021.

HABITER L'INCERTAIN

UN NOUVEAU TRAMWAY POUR L'OUEST LAUSANNOIS

Parmi les enjeux du plan climat on retrouve la volonté de réduire à zéro les émissions directes de gaz à effet de serre d'ici 2050 pour les bâtiments et traitement des déchets. Mais l'un des enjeux qui marquera le plus le paysage urbain de Lausanne est probablement sa volonté d'atteindre les zéros émissions directes provenant de la mobilité dès 2030. À cette date là, l'accès aux voitures à moteur thermique sera interdit sur le sol de la commune. Les modes de déplacement des lausannois est donc amené à fortement évoluer en favorisant les transports en commun, le vélo et les déplacements pédestres. Mais si les modes de déplacement doivent changer, c'est tout un réseau de mobilités variées qui doit s'adapter et par conséquent le tissu urbain le composant.

La ville travaille dès aujourd'hui à la proposition de nouvelles offres de mobilité éco-responsables. L'une d'entre elles est la construction d'une nouvelle ligne de tramway entre la gare de Renens et Lausanne-Flon : le t1
Ce tramway devient la colonne vertébrale des transports publics dans l'Ouest lausannois, grâce à des connexions avec les métros, le LEB, les gares CFF de Prilly-Malley et de Renens, ainsi que de futures lignes de bus. Il traverse les communes de Lausanne, Prilly, Renens et Crissier, et permettra de répondre à la forte densification des secteurs de Sévelin/Sébeillon, Prilly-Malley et Renens-Gare. Il offre pour les habitants une réelle alternative à la voiture et cherche ainsi à réduire de 10% le trafic individuel. Cela représentera 850t de CO₂ en moins par an. Le tramway permettra dès 2026 de rejoindre Renens-Gare depuis le Flon en 15min et transportera près de 50'000 voyageurs par jour à l'horizon 2030.

Bien plus qu'un simple mode de déplacement, le tramway contribue à la métamorphose du visage de Lausanne. Il accorde une nouvelle place aux piétons, aux vélos et à la nature en ville, et met ainsi en valeur les lieux qu'il dessert. Le dynamisme certain attendu avec sa construction fait de ses abords une opportunité architecturale particulièrement intéressante.



fig. 72 : ligne du tramway t1



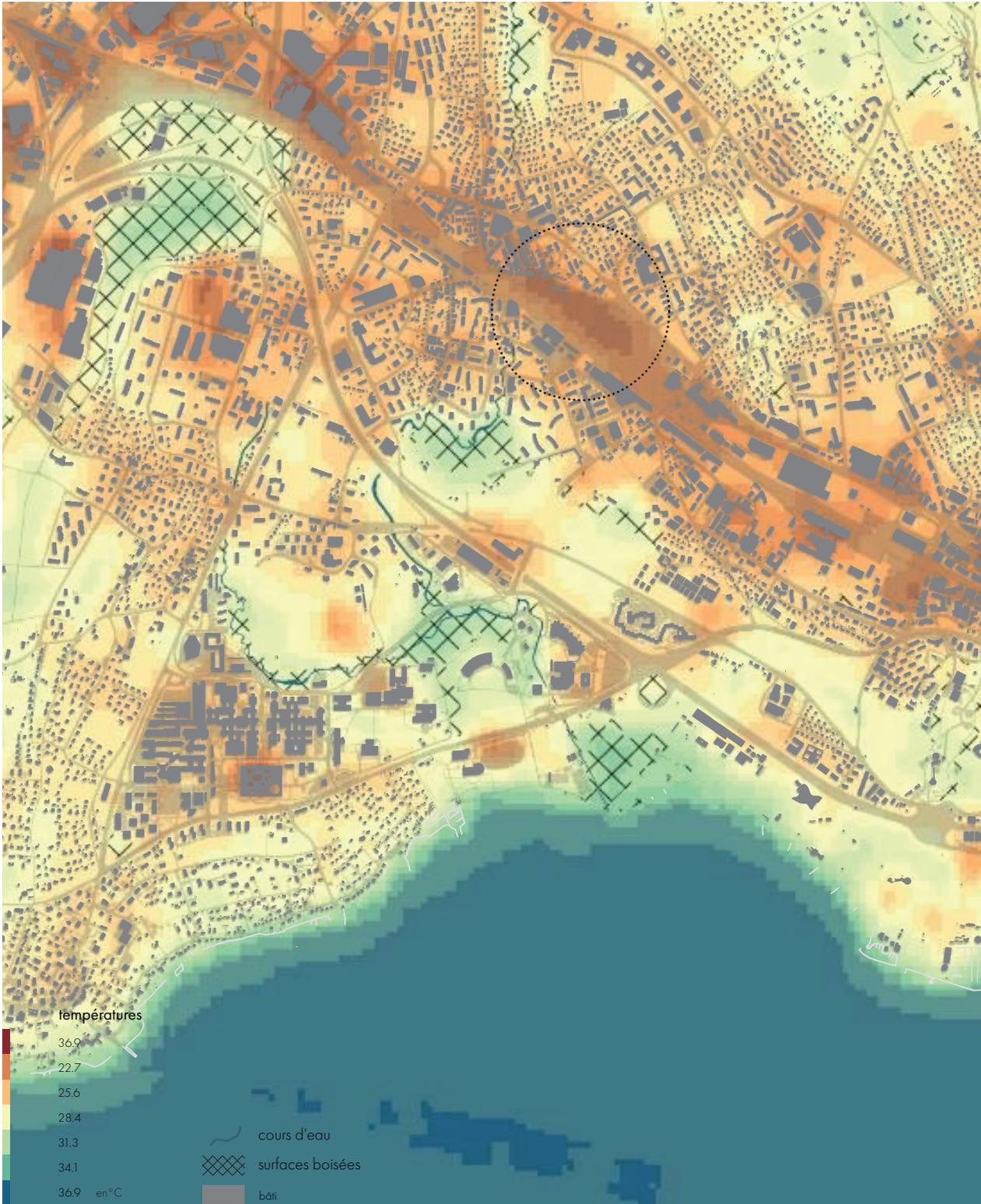
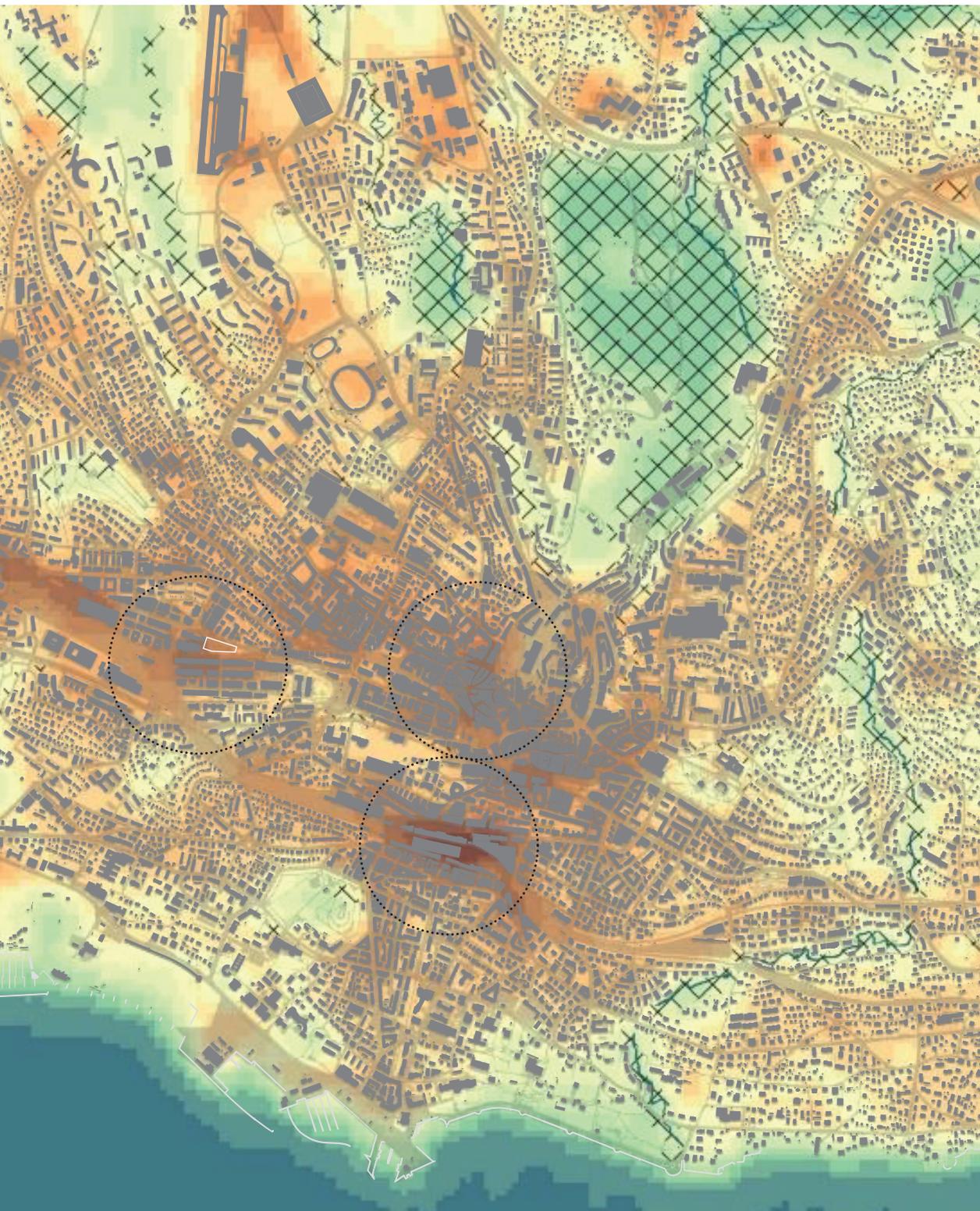
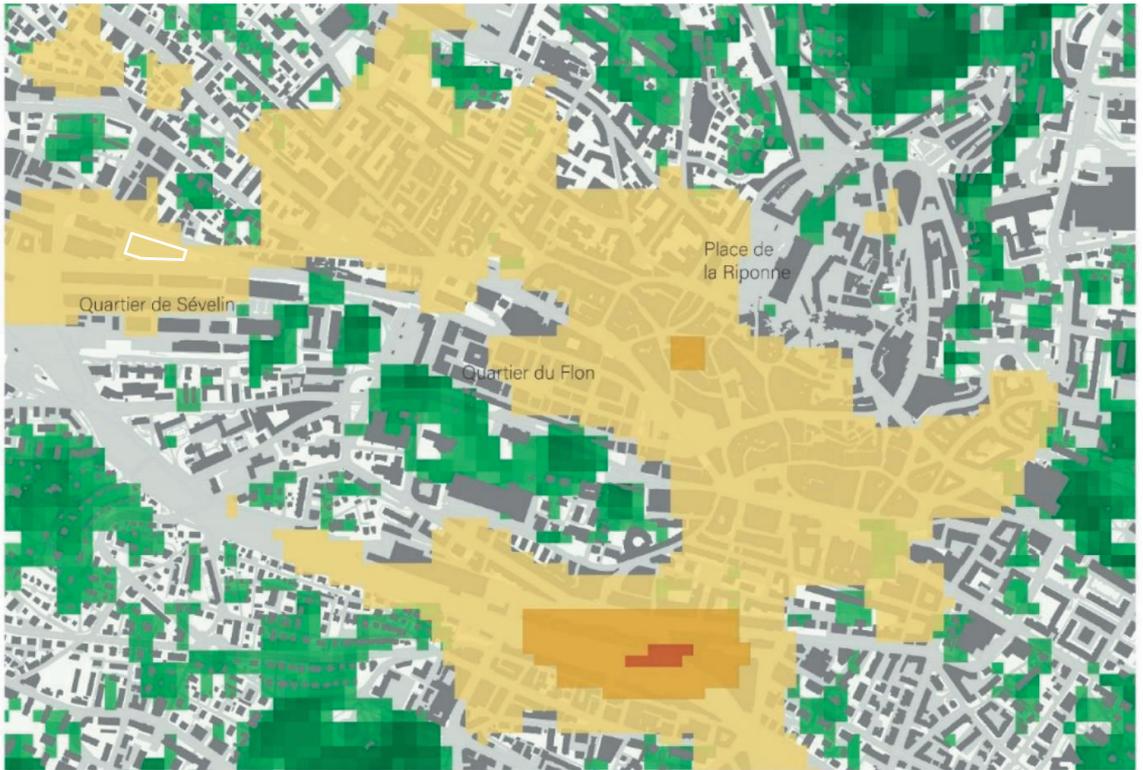


fig. 73 : températures de surface, été 2019



carte des températures de surface : merci à © Coline Bovay



HABITER L'INCERTAIN

LAUSANNE EN SURCHAUFFE

fig. 74 :
localisation des différents degrés d'ICU et végétation du centre-ville de Lausanne



L'îlot de chaleur urbain, souvent abrégé par ICU, se caractérise par une température en ville plus élevée que dans les zones rurales alentours moins urbanisées. Cela provient principalement d'une présence importante de surfaces minéralisées qui absorbent la chaleur et de la morphologie de la ville. La différence de température est surtout perceptible pendant la nuit. Il se crée une sorte de bulle de chaleur sur la ville.

Lausanne aussi est sujet au phénomène d'îlot de chaleur urbain. Ce sont les endroits où la température de surface du sol et des bâtiments^[1] composant la ville est particulièrement chaude, beaucoup plus comparée à une zone rurale. « Ces secteurs créent des ruptures dans le réseau vert lausannois et sont ainsi sujets à l'effet d'ICU^[2] », nous explique Coline Bovay, ancienne étudiante en géographie à l'UNIL.

Les îlots de chaleur urbains sont systématiquement identifiés au niveau d'une structure bâtie, là où la végétation est quasi absente. L'îlot le plus chaud de degré 3^[3], soit un échauffement de +10°C par rapport à une zone rurale, se trouve au niveau de la gare de Lausanne.

Les îlots de chaleur de degré 1, soit +6°C qu'en zone rurale, sont largement présents sur une grande partie du centre ville de Lausanne, densément bâti. Ils sont également visibles dans le quartier de Sévelin, dont le tissu bâti est certes moins dense mais très minéral et perméable à l'humidité.

L'analyse des îlots de chaleur urbains pour la ville de Lausanne permet de définir des lieux potentiels de réaction, afin d'offrir des potentiels de réversibilité à l'espace urbain.

[1] cf. fig. 73

[2] C. Bovay, « Ilots de chaleur urbains & végétation : Diagnostic et potentiels de réversibilité Le cas de Lausanne », maîtrise universitaire ès sciences en géographie, UNIL, Lausanne, 2020.

[3] voir fig.74



① 50 100 200 400m 1:10'000

HABITER L'INCERTAIN

UN SITE À FORT POTENTIEL

C'est ainsi que se dessinent les contours d'un site prometteur à la recherche d'un nouveau langage, qui allie considérations climatiques, urbaines et sociales : un parking découvert dans le quartier de Sévelin

fig. 75 :
localisation du site
choisi en bordure du
tramway t1

La parcelle identifiée se situe dans l'ouest de Lausanne, dans le quartier de Sébeillon-Malley, plus précisément le quartier de Sévelin. Ce quartier, marqué par son héritage industriel de la ville de Lausanne, accueille une population en forte augmentation depuis les années 2000. La progressive dé-industrialisation de la zone y accueille aujourd'hui 7% du parc de logement de la ville et génère 8% de l'emploi.

Le site retenu est aujourd'hui un large parking découvert privé, appartenant à PSP Real Estate SA, une société de gestion de biens immobiliers. Avec une surface de près de 6'000m², cette surface non construite représente une réelle opportunité architecturale de densification mais aussi d'espace vert dans ce contexte privilégié et en forte croissance.

Le choix de la parcelle découle du croisements des informations analysées précédemment : Proche du centre de Lausanne, le dynamisme de cette zone se verra très probablement renforcé de manière considérable avec la construction du tramway t1 reliant Renens-Gare à Lausanne-Flon à l'horizon 2026. Celui-ci passe dans la rue de Genève, soit au pieds de la parcelle mentionnée. L'usage de la voiture individuelle sera à l'avenir fortement réduit, rendant son usage actuel désuet. De plus, l'identification de points chauds dans la matrice urbaine de Lausanne place la parcelle dans une zone définit comme îlot de chaleur urbain de degré 1. Cela veut dire que les températures de surface y sont en été supérieure de +6°C par rapport à une zone rurale.

Ainsi, le site retenu offre un réel potentiel d'amélioration face à sa condition actuelle, sans aucune plus-value pour la communauté du quartier.



fig.76 : aperçu du site depuis la rue de Genève © Sébastien Léveillé



fig. 77 : vue aérienne du site

© Google



HABITER L'INCERTAIN

ACCÉDER AU SITE

L'accès au site se fait de manière multiple. Les chemements pédestres et cyclistes, ainsi que les transports en commun sont favorisés, mais la voiture est également une possibilité.

fig. 78 :
réseau de transports
en communs tl

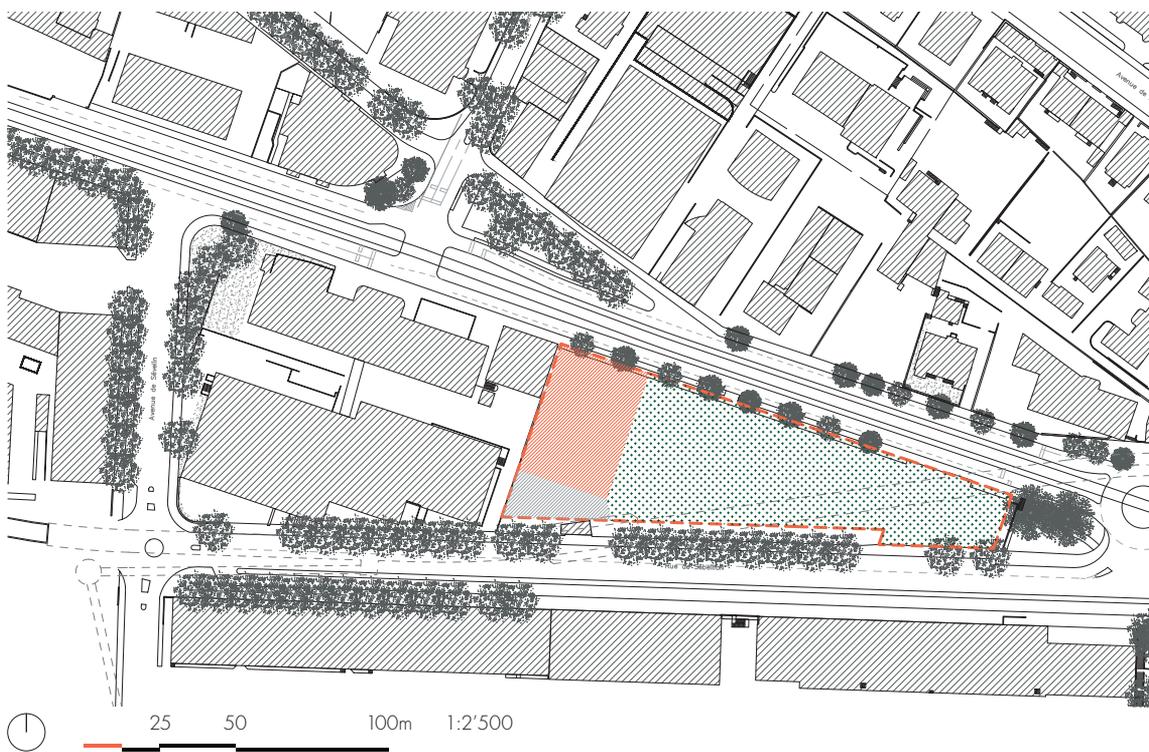
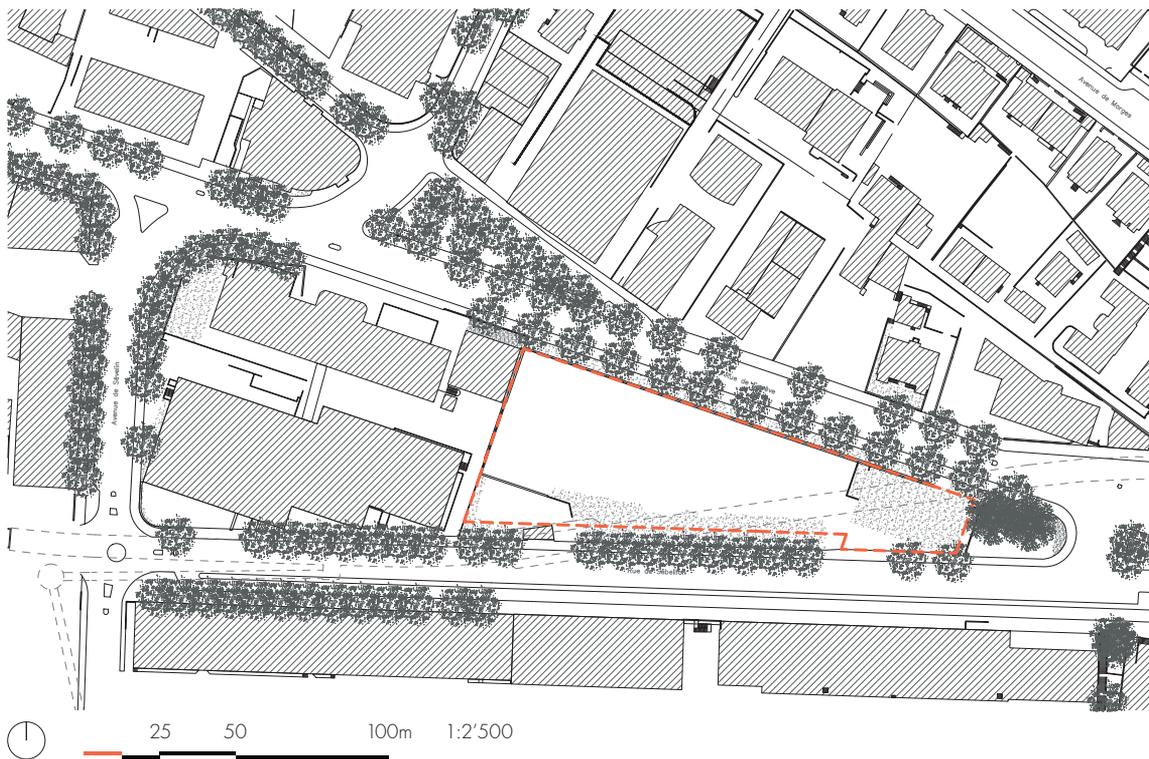
Lausanne possède une offre en transports publics très développée et renforce continuellement son réseau composé de métros, trains, tramway et bus, afin de répondre à la demande grandissante des habitants de la ville. La rapide croissance du quartier de Sévelin en un quartier mêlant résidentiel et emploi explique la nécessité de la nouvelle ligne de tramway et autres aménagements pour la mobilité douce.

Ainsi, le site est rapidement accessible grâce à une multitude de moyens de transports. Le tramway passant devant la parcelle s'arrêtera à moins de 200m aux arrêts École des métiers ou EPSIC. Il permettra de rejoindre le Flon en moins de 5min, ou la gare de Renens en 10min. Les 1.2km séparant le site du Flon peuvent être également parcourus à pieds en 13min.

L'aménagement de ce nouvel axe fort de la mobilité de Lausanne s'accompagne également de la construction d'itinéraires sécurisés à vélo. Ainsi, toutes les rues aux abords du site seront pourvus de pistes cyclables, permettant un déplacement sûr dans toutes les directions.

Le deuxième axe de transport fort de la région est le m1 à l'arrêt Montelly à seulement 400m, permettant de rejoindre facilement le quartier de Malley, ainsi que l'UNIL et l'EPFL. Les bus 9, 16 et 17 sont également accessibles dans un rayon de moins de 6min à pieds.

On notera tout de même que le réseau de transports public converge quasi systématiquement vers le Flon et que les lignes de desserte sont majoritairement parallèles les unes aux autres. Les déplacements vers et depuis la parcelle aux direction nord-sud devront se faire à pieds, vélo trottinette ou autre moyen de locomotion individuel futuriste.



HABITER L'INCERTAIN

fig. 79 :
plan de site actuel

PROGRAMME

Le choix de la densification en ville paraît naturel. Il exprime le sens durable d'une ville, en limitant la consommation de territoire, en mutualisant les espaces et les réseaux, tout en permettant la réduction de l'utilisation de ressources et d'énergie. La durabilité en ville, c'est proposer des lieux de vie continuellement animés, vivants et fonctionnels, utilisés par une mixité sociale, avec des programmes qui se s'imbriquent, se superposent et s'entremêlent.

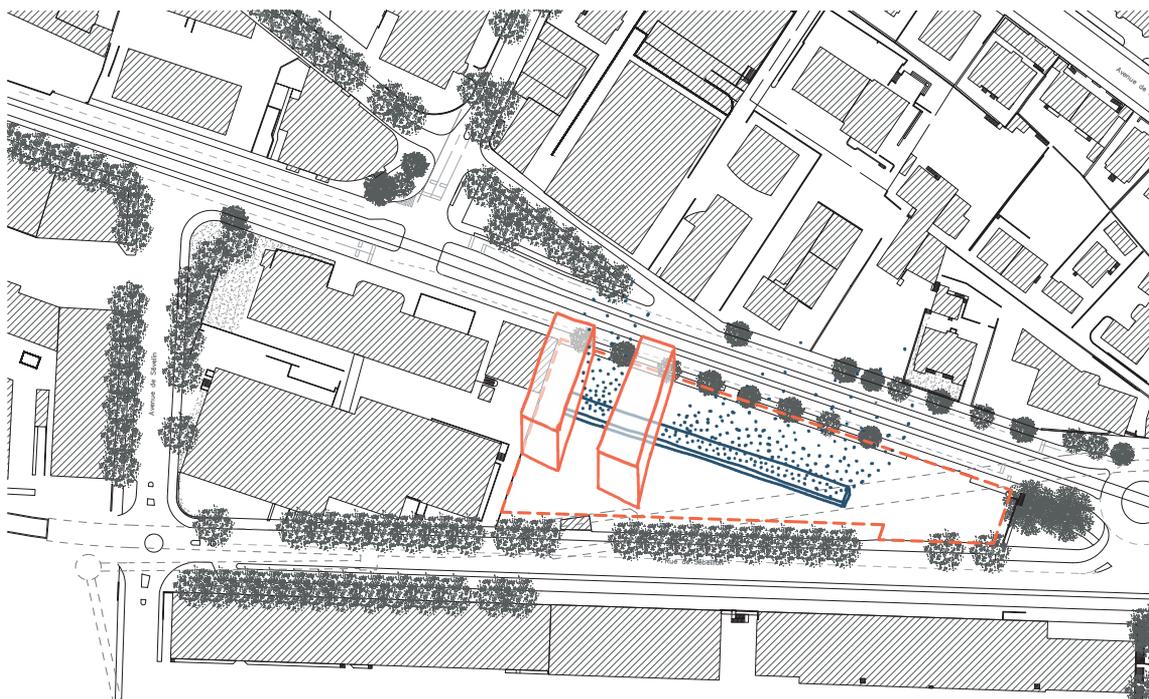
Ce site, par son emplacement au cœur de la ville et par sa surface, en fait une parfaite opportunité pour densifier le quartier au travers de logements, tout en rendant une partie de la surface aux habitants des alentours au travers d'un parc urbain.

fig. 80 :
plan de site en 2026
après construction du
tramway t1

	surface à bâtir 1'340m ²
	surface végétale 4'215m
	stationnement 380m ²

La surface sur la partie ouest de la parcelle pourra être dédiée à du logement collectif sous la forme d'une coopérative d'habitation. Les mécanismes d'action dont disposent les coopératives d'habitation permettent une réelle exploration de nouvelles façons d'habiter. Le logement individuel n'est aujourd'hui plus envisageable pour des considérations environnementales et climatiques, mais il faut savoir rendre le logement collectif désirable, et ce projet a l'ambition d'y parvenir.

Ainsi, la conception d'environ 40 logements sur plusieurs étages y est envisagée, avec des logements allant du 2 pièces au 6 pièces, favorisant notamment les modes de vie communautaires telles que les colocations. Il est envisageable que le rez-de-chaussé soit ouvert au public en accueillant quelques surfaces commerciales.



1:2'500

La majeure partie de la surface de la parcelle, soit environ 4'215m², pourra être dédiée à l'accueil d'un parc urbain ouvert au public. Son attractivité résidera dans la fraîcheur qu'il offre en été, fonctionnant comme un îlot de fraîcheur urbain au milieu d'un contexte bâti fortement minéralisé. La masse végétale offrirait alors une réelle réserve de fraîcheur continue. La combinaison avec un plan d'eau faisant le lien entre la partie logement et le parc, pourrait servir à la fois de stockage saisonnier d'eau et accentuer le pouvoir rafraîchissant de l'espace par évaporation de l'eau.

La présence en souterrain d'un tunnel ferroviaire menant à l'usine Tridel devra être considéré dans la planification.

Enfin, une surface en contrebas sur le côté sud pourra si nécessaire être utilisée comme zone de stationnement, comme c'est le cas aujourd'hui.

fig. 81 :
imbrication des
volumes

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

L. B. Alberti, *De re aedificatoria*, vol. livre 1. 1443.

M. Bencherif et S. Chaouche, « La maison urbaine à patio, réponse architecturale aux contraintes climatiques du milieu aride chaud », Université Mentouri, Constantine, 2013. Consulté le: 6 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.habiter-autrement.org/12.energies/contributions-12/Strategie%20de%20la%20maison-patio%20en%20tant%20que%20regulateur%20thermique.pdf>

Bill Anders published, « 50 Years After "Earthrise," a Christmas Eve Message from Its Photographer », Space.com, 24 décembre 2018. <https://www.space.com/42848-earthrise-photo-apollo-8-legacy-bill-anders.html> (consulté le 12 janvier 2022).

A. Bornarel, D. Gauzin-Müller, et P. Madec, « Manifeste pour une frugalité heureuse », 19 janvier 2018.

F. Boutté, « Durable en ville, vers une conception architecturale et technique renouvelée », in *Architecture = durable*, Paris: Éditions Pavillon de l'Arsenal : Éditions A. & J. Picard, 2008, p. 264.

C. Bovay, « Ilots de chaleur urbains & végétation : Diagnostic et potentiels de réversibilité Le cas de Lausanne », maîtrise universitaire ès sciences en géographie, UNIL, Lausanne, 2020.

S. Coccolo, « Urban greening », Lausanne, 2021.

A. Comment, « C'est dans l'air: la ventilation naturelle », *Espazium*, 30 juillet 2021. <https://www.espazium.ch/fr/actualites/cest-dans-lair-la-ventilation-naturelle> (consulté le 10 janvier 2022).

Conseil d'État, « Plan climat vaudois (1ère génération) - Stratégie du Conseil d'État vaudois pour la protection du climat », Canton de vaud, Epalinges, juin 2020.

J.-L. Dadoux, D. Chuard, J.-P. Eggimann, et C. Scaler, *Architecture climatique équilibrée - Conception, démarche et dimensionnement*, PACER, Office fédéral des questions conjoncturelles. Lausanne, 1996.

Designing Buildings, « Night-time purging », 17 décembre 2021. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Night-time_purging (consulté le 6 janvier 2022).

E6 Consulting, « Un ilot de fraîcheur a Cenon (33): le projet vision ». Consulté le: 14 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=HCRDM-jfcQQ>

ECOinfos, « Principe de fonctionnement du puits canadien aéraulique », ECOinfos, 19 janvier 2021. <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/puits-canadien/principe-de-fonctionnement-du-puits-canadien-aeraulique/> (consulté le 21 décembre 2021).

V. Felber, « « Se contenter de demi-mesures ne suffira pas » », *Espazium*, 24 novembre 2021. <https://www.espazium.ch/fr/actualites/se-contenter-de-demi-mesures-ne-suffira-pas> (consulté le 10 janvier 2022).

J. Ferrier et Pavillon de l'Arsenal (Paris, France), Éd., Architecture = durable: 30 architectes, 30 projets en Île-de-France. Paris: Éditions Pavillon de l'Arsenal : Éditions A. & J. Picard, 2008.

Y. Fouquart, « Les différents types de forçage », Futura Planète, 5 juin 2011. Consulté le: 29 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-rechauffement-climatique-question-forcages-1117/page/2/>

G. Gaget, « Le refroidissement adiabatique, le futur de la climatisation », XPair, 2 juillet 2020. https://conseils.xpair.com/actualite_experts/refroidissement-adiabatique-futur-climatisation.htm (consulté le 6 janvier 2022).

GIEC, « Changement Climatique 2014 », GIEC, Genève, Suisse, rapport de synthèse, 2014.

GIEC, « Changement Climatique 2021 - fondement des sciences physiques », GIEC, Genève, Suisse, summary for policy makers 6, août 2021.

GIEC/OMM, « Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante », GIEC, Genève, Suisse, communiqué de presse, août 2021.

IEA, « The Future of Cooling – Analysis », IEA, mai 2018. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling> (consulté le 8 janvier 2022).

L. Jorio, « Comment le ciment prépare sa révolution écologique », SWI swissinfo.ch, 10 mars 2021. https://www.swissinfo.ch/fre/economie/construction-et-%C3%A9cologie_comment-le-ciment-pr%C3%A9pare-sa-r%C3%A9volution-%C3%A9cologie/46417346 (consulté le 11 janvier 2022).

L. Jorio, « Quand le corps humain devient une centrale électrique », SWI swissinfo.ch, 24 avril 2021. <https://www.swissinfo.ch/fre/economie/quand-le-corps-humain-devient-une-centrale-%C3%A9lectrique/46539074> (consulté le 10 janvier 2022).

L. Jorio, « La contribution «décevante» de la Suisse à une planète sans émissions de CO2 », 27 octobre 2021. Consulté le: 3 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.swissinfo.ch/fre/la-contribution--decevante--de-la-suisse-%C3%A0-une-planete-sans-emissions-de-co2/47062098?utm_campaign=teaser-in-channel&utm_content=o&utm_medium=display&utm_source=swissinfoch

L. Jorio et P. Turban, « La Suisse réduit ses émissions de CO2, mais pas assez vite », 5 juillet 2020. Consulté le: 3 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.swissinfo.ch/fre/emissioni-co2_moins-de-vaches-plus-de-vehicules--la-suisse-va-rater-son-objectif-climatique/45875818

C. Karmann, « Confort & Energie », présenté à cours UEK-AR440, Lausanne, octobre 2020.

SUEZ, « Vision - quelles solutions de rafraîchissement basées sur l'eau en ville? », document de synthèse, 2021.

D. Licina, « IAQ and ventilation #2 », présenté à EPFL, Lausanne, 15 octobre 2020.

manifeste signé par 15 364 scientifiques de 184 pays, « Avertissement à l'humanité », BioScience, nov. 2017, Consulté le: 23 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: relayé par Le Monde à la même date, https://www.lemonde.fr/planete/article/2017/11/13/le-cri-d-alarme-de-quinze-mille-scientifiques-sur-l-etat-de-la-planete_5214185_3244.html

K. Marx, Critique de la critique critique (1845). Paris: Gallimard, 1982.

MétéoSuisse, La période de référence préindustrielle, (14 juin 2019). Consulté le: 28 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://vimeo.com/342195105?embedded=true&source=vimeo_logo&owner=30174805

MétéoSuisse, « Evolution de la température et des précipitations », 30 janvier 2020. Consulté le: 28 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changeement-climatique-suisse/evolution-de-la-temperature-et-des-precipitations.html>

MétéoSuisse, « Comprendre les scénarios climatiques », 2021. Consulté le: 2 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisse/comprendre-les-scenarios-climatiques.html#924596455>

MétéoSuisse, « L'évolution de la température en Suisse en comparaison mondiale », MétéoSuisse-Blog, 12 mai 2021. <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/actualite/meteosuisse-blog/meteosuisse-blog.subpage.html/fr/data/blogs/2021/5/l-evolution-de-la-temperature-en-suisse-en-compara.html> (consulté le 28 décembre 2021).

MétéoSuisse, « Le nouveau rapport du GIEC : principales déclarations et regard sur la Suisse », MétéoSuisse-Blog, 9 août 2021. <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/actualite/meteosuisse-blog.subpage.html/fr/data/blogs/2021/8/der-neue-ipcc-bericht--hauptaussagen-und-blick-in-.html> (consulté le 27 décembre 2021).

Ministère de la transition écologique, « Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde », Paris, déc. 2020. Consulté le: 27 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/2-causes-du-changement-climatique>

F. Moscheni, « Plan climat: la Ville de Lausanne a-t-elle un plan B? », 15 juin 2021. Consulté le: 4 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.24heures.ch/plan-climat-la-ville-de-lausanne-a-t-elle-un-plan-b-697618119180>

NatGeoFrance, « Le "Lever de Terre" de 1968 a bouleversé notre vision du monde (et du cosmos) », National Geographic, 22 décembre 2018. <https://www.nationalgeographic.fr/espace/le-lever-de-terre-de-1968-bouleverse-notre-vision-du-monde-et-du-cosmos> (consulté le 12 janvier 2022).

NCCS, « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse », National Centre for Climate Services NCCS (MétéoSuisse), EPF Zurich, Center for Climate Systems Modeling (C2SM), Zürich, 2018.

NCCS, « Changement climatique mondial », 2018. Consulté le: 2 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/climat-mondial/changement-climatique-mondial.html>

NCCS, « Changement climatique Suisse », 7 janvier 2021. Consulté le: 28 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse.html>

NCCS, Changement climatiques dans le canton de Vaud - Ce que l'on sait et ce qui est attendu dans le futur, 1.0. Zürich: National Centre for Climate Services NCCS, 2021.

OFEN, « Statistique globale Suisse de l'énergie 2019 », Office fédéral de l'énergie, Berne.

OFEV, « Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse 1990–2019 », Berne, avr. 2021.

OFEV, « Climat: en bref », 17 août 2021. Consulté le: 29 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/en-bref.html#-1333200555>

« Changements climatiques en Suisse - Indicateurs des causes, des effets et des mesures », Berne, 2020. Consulté le: 28 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: www.bafu.admin.ch/uz-2013-f

J. Pellet, V. Sonnay, C. Randin, P. Sigg, M. Rosselet, et E. Graz, « Arborisation urbaine lausannoise et changements climatiques », janv. 2021.

P. Rahm, Histoire naturelle de l'architecture - Comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments, Pavillon de l'Arsenal. Paris, 2020.

T. F. Stocker, « The closing door of climate targets », Science, 18 janvier 2013.

SUEZ, « Le LyRE fait baisser la température d'un îlot de chaleur urbain à Cenon (33) », SUEZ. <https://www.suez.fr/fr-fr/notre-offre/succes-commerciaux/nos-references/lyre-ilot-chaleur-urbain-cenon-solution> (consulté le 13 janvier 2022).

P. Tosolini, « Architecture vernaculaire », 2018. <https://www.hesge.ch/hepia/recherche-developpement/projets-recherche/en-cours/architecture-vernaculaire> (consulté le 9 janvier 2022).

Ville de Lausanne, « Plan Climat Lausanne », Lausanne, brochure, 2021.

E. Viollet-Le-Duc, Entretiens sur l'architecture, A. Morel et Cie., vol. 2. Paris, 1863.

WMO, « The State of the Global Climate 2020 », Genève, WMO-No. 1264, 2021. Consulté le: 29 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618

D. Wright, Manuel d'architecture naturelle. Marseille: Editions Parenthèses, 2018.

WWF, « Footprint - évaluation détaillée », déc. 2021.

Physique du bâtiment I & II. Lausanne: EPFL, 1991.

« Artois-Douaisis: envie de fraîcheur? Tous à l'église ou à la mer... de Flines », 24 août 2016. Consulté le: 5 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lavoixdunord.fr/37051/article/2016-08-24/ar-tois-douaisis-envie-de-fraicheur-tous-l-eglise-ou-la-mer-de-flines>

« Le Tramway lausannois acteur de la modernité par ses performances », 6 août 2020. <https://www.tramway-lausannois.ch/acteur-de-la-modernite/> (consulté le 15 janvier 2022).

« Energy statistics - an overview », eurostat, mai 2021. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview (consulté le 9 janvier 2022).

« Energy consumption in households », eurostat, juin 2021. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households (consulté le 9 janvier 2022).

« Évapotranspiration », Wikipedia, 24 octobre 2021. https://fr.wikipedia.org/wiki/Évapotranspiration#Transpiration_végétale (consulté le 6 janvier 2022).

« définition : adiabatique », Larousse. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adiabatique/1073> (consulté le 6 janvier 2022).

« Eau et forêt, une association naturelle », Office National des Forêts. http://www1.onf.fr/gestion_durable/++oid++91e/@@display_advise.html (consulté le 6 janvier 2022).

« Ventilation naturelle et hybride - Céligny, logements », Perenzia. <http://www.perenzia.ch/> (consulté le 10 janvier 2022).

