



RÉSILIENCE

VOLET 2

**BÂTI ET INFRASTR
À L'ÉPREUVE
DES CANICULES**



UCTURES

TEXTE : FRANÇOIS PLOYE
PHOTOS & ILLUSTRATIONS : AJEANCE,
CEREMA, DIAGONALE CONCEPT, GROUPEMENT
CDC-CDC HABITAT-ICADE PROMOTION,
GROUPEMENT NEXITY SA/EIFFAGEIMMOBILIER
IDF, INSTITUT PARIS RÉGION, LAB RÉUNION,
JEAN-MARC LAUBY/AQC, PICHET-LEGENDRE/
MY LUCKY PIXEL-METROCHROME-ADVENTO

Surchauffe et canicules, épisodes de sécheresse, sont des événements de plus en plus fréquents, mettant à rude épreuve les populations, le bâti ainsi que les infrastructures avec le retrait-gonflement des argiles.

Photo © Pichet-Legendre / My Lucky Pixel - Metrochrome - Advento

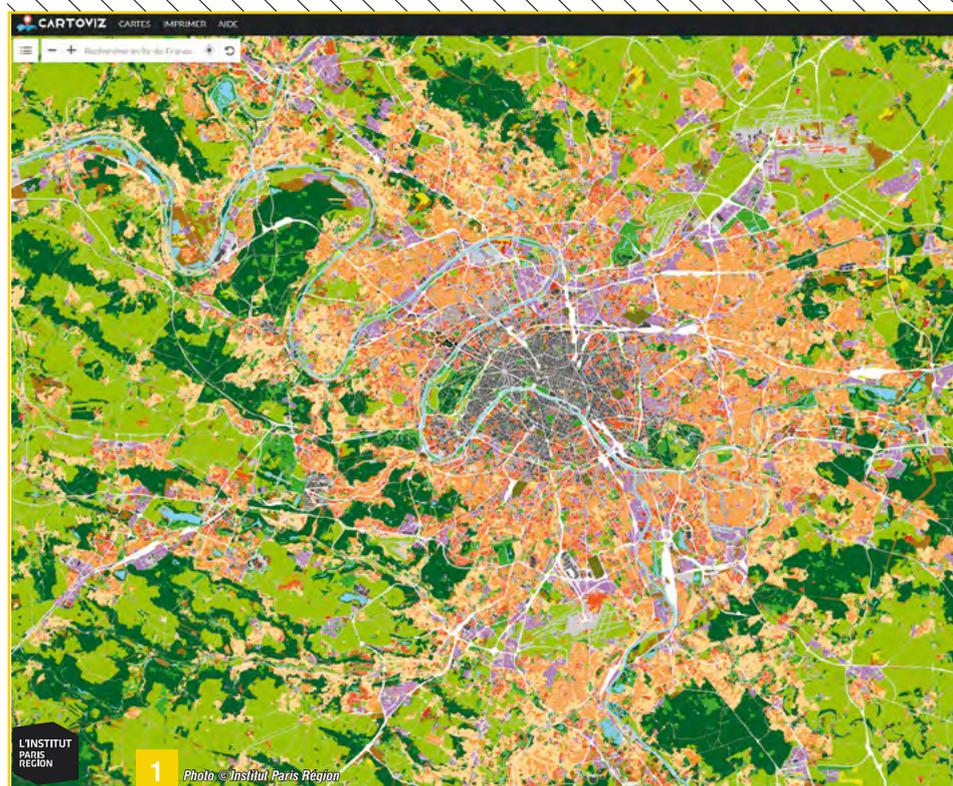
Un des quatre secteurs du futur Village olympique et paralympique : l'écoquartier fluvial sur l'Île-Saint-Denis (93), un quartier mixte en termes d'activités et sans voitures. Les bâtiments construits seront 100 % passifs et raccordés au réseau de chaleur urbain. Maîtrise d'ouvrage : la Plaine Commune Développement.

Du fait du bouleversement climatique en cours, plusieurs des années les plus chaudes que la planète ait connu figurent parmi les vingt dernières années, et la tendance à la hausse devrait se poursuivre. Les vagues de chaleur se déplacent dans le nord de la France, dans des régions qui vont devoir accélérer leur adaptation pour y faire face. Dans les centres-villes notamment, les effets de ces canicules sont exacerbés par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), se conjuguant parfois à une densification mal organisée. Ce constat nécessite de protéger et de renforcer les îlots de fraîcheur existants, et d'en créer de nouveaux. Globalement, la problématique du confort d'été va devenir plus cruciale à traiter dans les décennies prochaines et demande à être prise en compte dès la conception d'une construction neuve ou d'une rénovation.

Les îlots de chaleur urbains

La différence de température entre la ville et la campagne environnante lors d'une journée ensoleillée d'été est en moyenne supérieure à 4 °C, et peut atteindre 6 à 10 °C en période de canicule comme celle de 2003. La chaleur du soleil s'accumule en journée dans les surfaces minérales du milieu urbain et peut être insuffisamment dissipée en période nocturne. Le thermomètre grimpe jour après jour, ce qui crée un phénomène nommé îlot de chaleur urbain. Le choix de matériaux qui ne stockent pas la chaleur – comme le bois – et ceux avec une valeur élevée d'albédo (valeur caractérisant le pouvoir réfléchissant d'une surface) permet de limiter l'accumulation de chaleur. La conception de l'espace joue aussi un rôle, à l'image des ruelles étroites et ombragées des centres-villes historiques où l'air circule. La présence d'eau et de végétation sont deux principaux facteurs forts d'adaptation de la ville à la chaleur et peuvent localement créer des îlots de fraîcheur. «*Mais pour que la végétation puisse rafraîchir, son évapotranspiration doit être maximale, or l'eau est plus rare l'été. Afin d'éviter le recours au réseau d'eau de ville pour arroser les plantes, il est possible d'utiliser l'eau de la nappe phréatique en pompant l'été et en infiltrant l'hiver, ou de récupérer les eaux grises comme l'eau de vidange d'une piscine ou les eaux d'infiltration sous un parking. À Paris, le réseau d'eau non potable brute qui vient de la Seine et du Canal de l'Ourcq pourrait servir à alimenter des îlots de fraîcheur*», confie Christian Piel, architecte urbaniste et fondateur d'Urban Water.

Le thème de l'ICU a fait l'objet du projet de recherche EVA (Eau, végétal, albédo), coordonné par l'Institut de recherche en sciences et techniques de la Ville (IRSTV) et terminé en 2017. Son objectif était d'évaluer la performance de trois familles de dispositifs de rafraîchissement urbain : la végétalisation, l'humidification de la chaussée et l'utilisation de matériaux à fort albédo pour les revêtements de la voirie. Des tests ont été réalisés dans le quartier particulièrement dense de la Part-Dieu à Lyon. Les deux dispositifs à privilégier d'après l'étude sont l'humidification et la végétation, avec une réduction moyenne de la température d'air pouvant atteindre 2 °C à certains moments de la journée. L'étude confirme aussi la



“La problématique du confort d'été va devenir plus cruciale à traiter dans les décennies prochaines et demande à être prise en compte dès la conception d'une construction neuve ou d'une rénovation”

spécificité de chaque projet : la végétation peut en effet avoir un impact négatif, par exemple une présence trop importante d'arbres peut dégrader localement le confort en faisant barrière au vent.

Les villes se mobilisent

Pour la Ville de Paris, la réduction des îlots de chaleur fait partie des sujets de la stratégie de cité résiliente et s'illustre au travers du programme « Cours Oasis », qui consiste à transformer une sélection de cours d'écoles en îlots de fraîcheur. Les cours des écoles et des collèges représentent plus de 70 hectares de surface sur le territoire parisien avec une répartition assez homogène. À la rentrée 2018, trois premières cours d'écoles élémentaires ont été rénovées et le programme se poursuit. Le cahier des charges comprend le remplacement des surfaces asphaltées par des matériaux perméables et adaptés aux fortes chaleurs, l'installation de fontaines et jeux d'eau, la création de zones ombragées, de zones de pleine terre et le renforcement de la végétalisation tant sur les arbres, murs et toitures qu'au travers de jardins et potagers pédagogiques.

À la Métropole de Bordeaux, la stratégie d'adaptation au changement climatique, en cours d'élaboration, contribuera à généraliser la prise en compte des ICU dans les projets d'aménagement. Sur la demande de la Ville, le bureau d'études E6 Consulting a développé dès 2016 un outil logiciel, *Score ICU*, qui permet à une collectivité d'analyser le phénomène d'ICU sur une opération d'aménagement urbain et d'être autonome pour établir un diagnostic. «*Parmi les réponses à l'îlot de chaleur figure le fait d'avoir des parkings silos, des bâtiments clairs, de la végétation en sol ou en toiture et globalement moins de minéral et une architecture*

Légende Local Climate Zones (LCZ)

- Arbres denses
- Arbres éparés
- Buissons, broussailles
- Pelouses, prairies, cultures
- Roche nue, pavés, macadam
- Cimetière arboré
- Terrain nu ou sable
- Eau
- Ensemble de tours compact
- Ensemble d'immeubles compact
- Ensemble de maisons compact
- Ensemble de tours espacées
- Ensemble d'immeubles espacés
- Ensemble de maisons espacées
- Constructions légères
- Grandes emprises tertiaires bâti bas
- Maisons éparées, constructions isolées
- Industrie lourde

Source : Cartoviz
<https://cartoviz.institutparisregion.fr>



Photo © Groupement CDC - CDC Habitat - Icade Promotion

2

adaptée avec de l'ombre et des fontaines. Il faut s'inspirer des pays chauds et préférer plutôt des solutions passives et pas forcément de la haute technologie à part peut-être le Coolroof, une peinture à haute émissivité pour toiture», précise Olivier Papin, responsable innovation chez E6 Consulting. Score ICU a été déployé sur la Métropole de Bordeaux et une vingtaine d'agents avec plutôt un profil de dessinateur projeteur ont été formés à son usage. Karine Seigneur, chargée de mission Adaptation au changement climatique à la Métropole et utilisatrice du logiciel, témoigne : « Depuis 2015, une bonne trentaine de projets d'aménagement urbain en grande partie déjà validés ont été analysés. Sur un cas précis d'un renouvellement urbain, le site Prévôt à Bassens (33), cette analyse a permis de faire évoluer le projet qui comportait plusieurs grands bâtiments aux toitures foncées. Différentes variantes de teintes ont été étudiées et la proposition avec des teintes gris moyen a été retenue. Un des intérêts du comparatif visuel apporté par Score ICU est de faciliter l'échange avec les urbanistes, les aménageurs, mais aussi les élus. » Les principaux projets analysés sont des projets de requalification urbaine, comme des rénovations et transformations de friches urbaines ou industrielles. Les études réalisées montrent en général un effet positif avec une réduction du phénomène de l'îlot de chaleur du fait d'une végétalisation accrue, de la réduction de la surface de voirie ou d'un enrobage plus clair des cheminements piétons. « Les outils en sont encore au stade du déploiement. L'objectif est que la prise en compte de l'ICU devienne un réflexe comme outil d'aide à la décision pour réaliser des études d'impact des projets d'aménagement et des infrastructures routières », soutient Sarah Gregory, responsable du service Santé et qualité de vie à la Métropole de Bordeaux.



1 L'application « Chaleur en Ville » permet aux professionnels de mesurer l'impact climatique en fonction de la morphologie urbaine de chaque îlot d'Ile-de-France. L'Institut Paris Région a caractérisé de manière fine les îlots urbains et ruraux franciliens pour déterminer à quelle « zone climatique locale » ils appartiennent.



2 Secteur D du Village des athlètes à Saint-Ouen-sur-Seine (93). Le maître d'ouvrage Solidéo a défini une stratégie globale d'excellence environnementale, dont les prescriptions ont été inscrites dans les cahiers des charges des opérateurs immobiliers de tous les ouvrages pour les Jeux olympiques et paralympiques (JOP) 2024.

La résilience au menu des JOP 2024

La Solidéo (Société de livraison des ouvrages olympiques) ambitionne de faire des Jeux olympiques et paralympiques (JOP) de Paris 2024 un accélérateur pour la transition écologique, dont l'objectif à l'horizon 2050 est l'atteinte de la neutralité carbone. Pour le Village des athlètes installé en Seine-Saint-Denis (93), l'objectif global est une diminution de 40 % de l'impact carbone en 2024, par le recours massif au bois, au réemploi et aux matériaux bas carbone, par la recherche d'une sobriété énergétique et par le recours à la logistique fluviale pour évacuer les déblais. « Concernant la résilience, le sujet est le confort d'été en ville, également lié à d'autres sujets comme la place du végétal et la défense de la biodiversité. Nous avons établi un partenariat avec Météo France qui a établi une référence pour un climat actuel et des simulations de climat en 2025 et 2050, suivant deux hypothèses d'une année moyenne et d'une année caniculaire. Les modèles prévoient des canicules à 46 °C à l'horizon 2040 et un climat à Paris similaire à celui de Séville en 2050. Ces prévisions nous ont servi à rédiger un Cahier de prescriptions d'excellence environnementale (CPEE) qui a été associé à la consultation des opérateurs immobiliers pour la construction du Village des athlètes, dès le lancement de l'opération au printemps 2019, et dont les objectifs ont été repris et adaptés pour la construction du Cluster des médias et de l'ensemble des sites olympiques et paralympiques. Une des demandes est l'obligation de réaliser des analyses par STD (Simulation thermique dynamique) pour le climat actuel et les climats 2050 moyen et caniculaire », assure Antoine du Souich, directeur de la stratégie et de l'innovation de la Solidéo. Pour le climat actuel, il est possible de >>>

répondre au cahier des charges de manière passive en gardant du confort même en période de canicule, avec un seuil défini à moins de 160 heures d'inconfort par an ; l'inconfort est défini lorsque la température à l'intérieur du logement atteint 28 °C.

Un défi sur le long terme

En revanche, le passif ne suffit plus pour garantir le confort d'été lors des canicules de 2050 sur des immeubles de logements, et un complément de rafraîchissement est nécessaire. La Solidéo travaille avec les collectivités et avec le Smirec (Syndicat mixte des réseaux d'énergie calorifique) sur l'extension des réseaux existants de chaleur et de froid vers Saint-Denis, et qui peuvent en particulier être alimentés par géothermie. Le recours au froid est actuellement limité au tertiaire mais son utilisation à terme pour le résidentiel est à anticiper. L'idée est de faire venir le réseau de froid au pied des immeubles avec une distribution dans les logements par des planchers chauffants-rafraîchissants, qui sont, dès la conception, dimensionnés et équipés pour pouvoir être utilisés en rafraîchissement. Des tests de rafraîchissement pourraient être d'ailleurs menés pendant les Jeux de 2024. «À plus long terme, des réflexions ont lieu pour créer des espaces refuges, des espaces rafraîchis où la situation soit acceptable quel que soit le climat, dans un hall, un espace dédié ou un parking, et les équiper de moyens de premiers secours. Ces espaces pourraient servir en cas de dérèglement climatique, de canicule extrême ou de tempête, s'il se produit des désordres à l'échelle urbaine», avance Antoine du Souich. Une condition est de doter les habitations d'une autonomie électrique pendant quelques heures ou quelques jours, le temps que les secours arrivent. Une des clefs énergétiques pour la résilience à l'échelle du quartier est le foisonnement des productions d'énergie décentralisée, permettant de réduire la dépendance vis-à-vis des grands réseaux de distribution car cette future énergie décarbonée sera coûteuse. À travers ses ambitions environnementales élevées, «la Solidéo cherche à offrir une meilleure qualité de vie aux habitants ainsi que des infrastructures et des aménagements innovants qui auront un impact positif pour le territoire, en particulier en Seine-Saint-Denis. Notre but est de laisser un héritage "utile" des Jeux aux territoires», conclut Antoine du Souich.

La conception d'ouvrages résilients passe ainsi par une prise en compte des conditions météorologiques futures. Pour son siège français, le groupe KTR a choisi de rénover des bureaux à Dardilly dans la banlieue est de Lyon. Cette rénovation lourde et ambitieuse d'un point de vue environnementale a été confiée à la structure de maîtrise d'œuvre Diagonale Concept de Marc Campesi et livrée en 2018. Le bâtiment d'origine est une coque des années soixante-dix, une structure métallique avec un remplissage en verre, présentant tous les défauts d'une passoire thermique. L'ossature métallique, une grande partie du bardage ainsi que les volumes existants ont été conservés. Un travail important a été réalisé sur l'enveloppe, notamment la pose d'un isolant biosourcé Biofib Trio, en lin, chanvre et coton, des vitrages plus performants et l'aménagement intérieur a été refait. «Mes projets sont conçus

“Une des clefs énergétiques pour la résilience à l'échelle du quartier est le foisonnement des productions d'énergie décentralisée, permettant de réduire la dépendance vis-à-vis des grands réseaux de distribution car cette future énergie décarbonée sera coûteuse”

pour être durables, performants et donc résilients afin de préparer au monde de demain. Aussi nous avons vérifié par simulation le bon comportement du siège de KTR lors d'une canicule à l'horizon 2050. Et en juin 2019, le bâtiment rénové a démontré qu'il peut supporter 40 °C lors d'une canicule grâce à un rafraîchissement de 17 °C», assure Marc Campesi.

Un autre exemple est donné par le chantier du futur centre sportif de l'Université de Strasbourg qui a été confié au collectif d'architectes Ajeance de Sélestat. Avec l'aide du bureau d'études thermique Terranergie, les architectes ont conçu une construction passive. Les données météo utilisées pour la STD ont été fiabilisées en prenant des mesures sur site pendant l'année 2018, qui ont servi à calibrer les données de la station météo la plus proche. «Ainsi nous avons pu partir pour nos simulations de fichiers météo plus réalistes que ceux existants dans les moteurs de calculs, à la fois avec trois fichiers pour la période actuelle (un de base, un avec l'effet îlot de chaleur, un avec îlot de chaleur et canicule) et un fichier prospectif en 2080. Ce type de grands espaces confortables en centre-ville, avec une protection solaire et rafraîchis avec très peu d'énergie pourra prendre de l'importance dans le futur et servir de refuges lors d'épisodes de forte canicule», précise Vincent Pierré, fondateur de Terranergie.

Pousser le confort passif dans ses retranchements

Si le confort d'été devient un sujet essentiel, installer une climatisation gourmande en énergie, comme un groupe froid, qui augmente l'émission de GES (Gaz à effet de serre) et qui rejette de la chaleur à l'extérieur, constitue une réponse inadaptée. La priorité doit être de pousser aussi loin que possible le rafraîchissement naturel par une conception bioclimatique et une ventilation naturelle. À Strasbourg, le nouveau centre sportif évoqué précédemment sera situé en pleine ville où existe un effet d'îlot de chaleur urbain. Il est conçu comme un bloc minéral compact avec une structure béton sur les deux premiers niveaux et une ossature bois aux niveaux supérieurs. «L'enjeu sur ce projet est d'être le plus performant possible énergétiquement avec des besoins en chauffage très faibles et concentrés de mi-décembre à mi-janvier pour des besoins estimés à moins de 1 kW/m² annuel. Hors saison de chauffage, un rafraîchissement passif est obtenu en conjuguant une enveloppe très performante avec des protections solaires et un appoint de la ventilation naturelle obtenue par l'effet cheminée de l'atrium et des sheds de la toiture», assure Vincent Pierré. Quasiment tous les vitrages – quelle que soit l'orientation de la façade, y compris au nord –, sont protégés par des BSO (Brise-soleil orientable) ou par des résilles métalliques. De larges brasseurs d'air laminaires viennent accentuer l'effet de rafraîchissement ressenti. Le chauffage estimé à moins de 1 kW/m² annuel et le rafraîchissement actif sont fournis par deux pompes à chaleur air/eau dont l'une à détente directe intégrée aux CTA (Centrales de traitement d'air) de marque Fläkt. «Globalement, le bâtiment n'a pas de problème de surchauffe car l'enveloppe est isolée et les vêtements des façades sont ventilés sur une épaisseur de 25 cm, donc l'apport solaire est évacué. >>>





Photo © Groupement Nexity SA - Eiffage Immobilier IDF

3

3 Secteur E du Village des athlètes à Saint-Ouen-sur-Seine (93). Pour éviter un inconfort majeur lors des canicules de 2050, le maître d'ouvrage Solidéo travaille sur l'extension des réseaux existants de chaleur et de froid vers Saint-Denis.

4 Rénovation lourde pour le siège français du groupe KTR confiée à l'agence Diagonale Concept et livrée en 2018 sur un bâtiment des années soixante-dix à ossature métallique.

5 Chantier KTR : l'enveloppe a été isolée avec un matériau biosourcé Biofib'Trio, en lin, chanvre et coton.

6 Futur Centre sportif de l'Université de Strasbourg, situé en pleine ville où existe un effet d'îlot de chaleur urbain. La Simulation thermique dynamique (STD) a été menée sur des hypothèses du climat en 2080.



Photo © Diagonale Concept

4

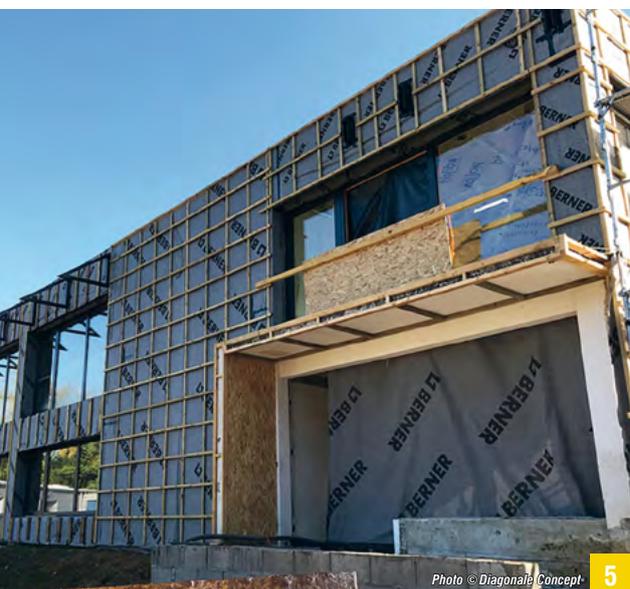


Photo © Diagonale Concept

5

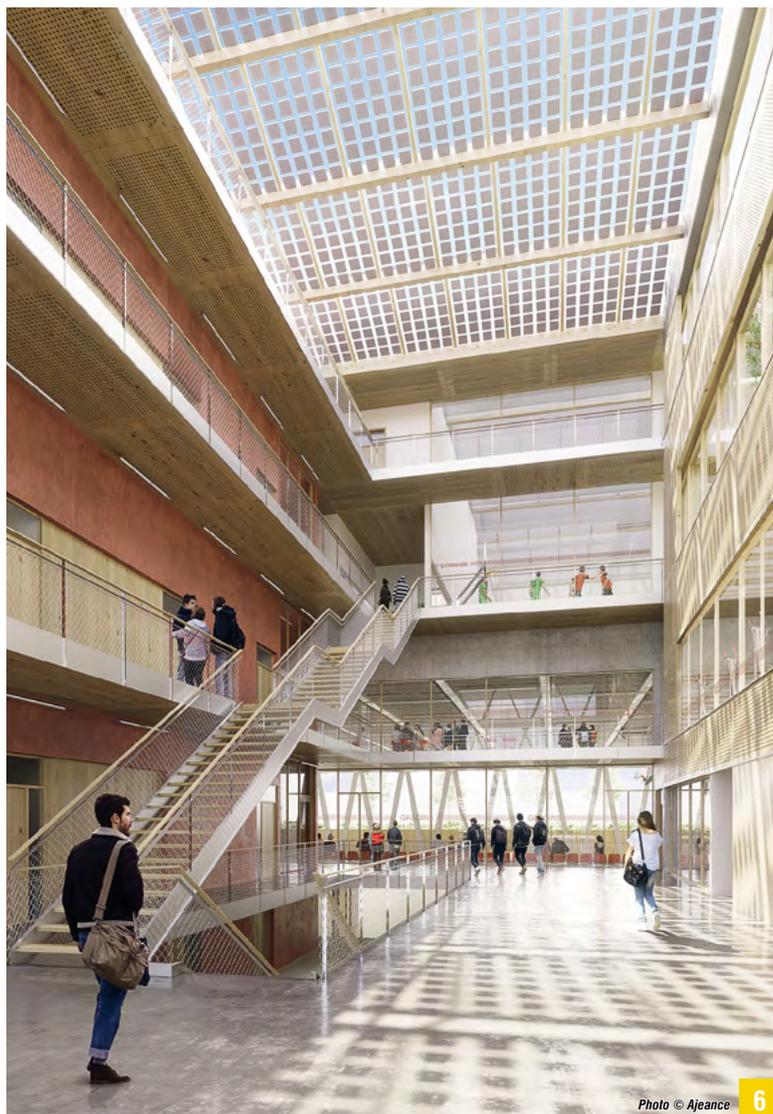
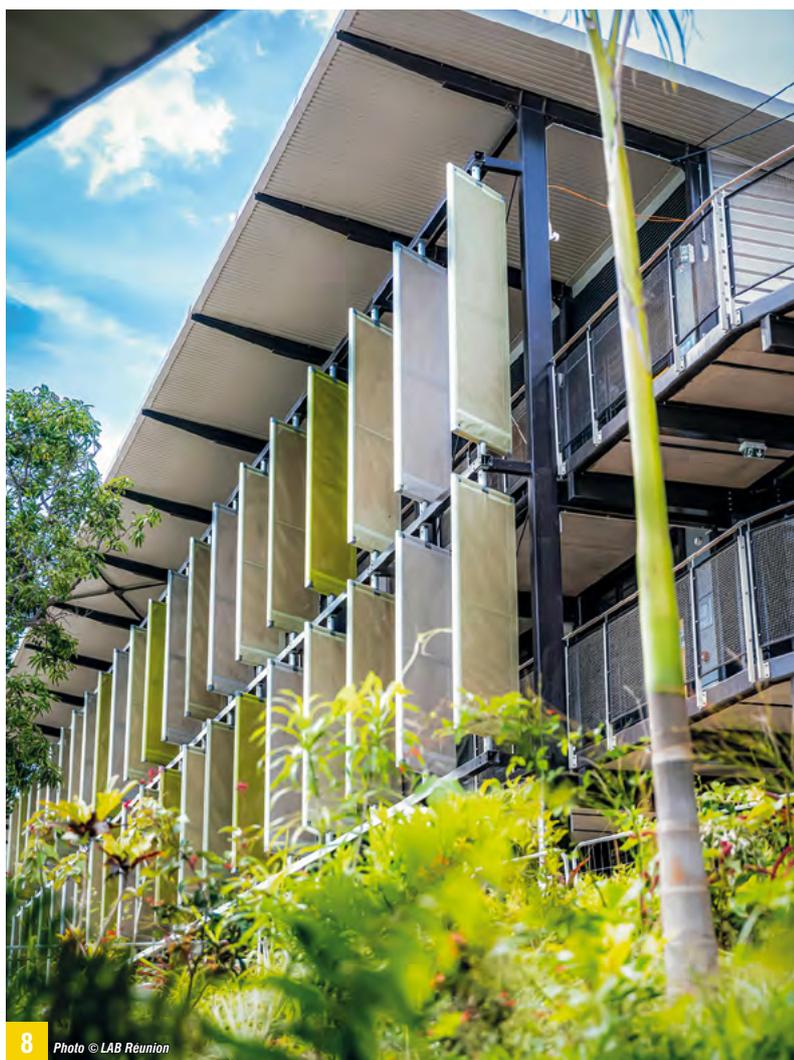


Photo © Ajeance

6



7 Photo © LAB Réunion



8 Photo © LAB Réunion

▲ Le Collège de Bouéni à Mayotte ⁷ Ayant ouvert ses portes à fin 2019, il concilie bioclimatisme et un recours à la ventilation naturelle. ⁸ Afin de limiter les charges externes, des brise-soleil fixes protègent les vitrages de tout rayonnement solaire direct.

Mais localement dans des espaces restreints comme les salles de danse ou de musculation, la chaleur doit être extraite de manière mécanisée», estime Vincent Pierré. Le bâtiment sera en outre équipé de deux centrales solaires photovoltaïques.

Les DROM, laboratoires de la résilience

Hors territoire métropolitain, en climat tropical et insulaire, les concepteurs doivent prendre en compte les risques cyclonique et sismique et garantir un confort toute l'année en évitant la surchauffe. Les architectes réunionnais Antoine Perrau et Michel Reynaud ont signé le nouveau Collège de Bouéni dans le sud de Mayotte, qui a ouvert ses portes à fin 2019 et accueille plus d'un millier d'élèves. Cet ouvrage emblématique de leur conception du bâtiment résilient concilie le bioclimatisme avec une orientation sur l'axe Est-Ouest favorable par rapport aux vents dominants, et un recours à la ventilation naturelle. Un vaste puits dépressionnaire dans le bâtiment administratif assure la pérennité du rafraîchissement naturel, avec un débit d'air neuf de 10 à 30 vol/h garantissant une excellente qualité de l'air intérieur. Cette ventilation naturelle assure un mode de fonctionnement dégradé en cas de coupure de l'alimentation électrique, par exemple à la suite d'un épisode cyclonique. «La résilience s'obtient par un recours large au rafraîchissement passif avec essentiellement un seul système actif que sont les brasseurs d'air en plafond utilisés les jours sans vent dans les salles de classe. Néanmoins, quelques locaux situés dans des configurations d'espace difficiles à ventiler ont nécessité d'être climatisés. La grande porosité des façades (N.D.L.R.: ouvertures) fait communiquer l'intérieur avec le climat extérieur et la gestion de la ventilation par les ouvrants en façades se fait par les occupants qui sont acteurs de leur confort et non par une GTB (Gestion technique du bâtiment)», assure Antoine Perrau. De plus, ce système >>>



Photo © Cerema

La maison pilote du projet Mach (dans le Loir-et-Cher) s'est fissurée suite à la sécheresse de 2015.

LE PROJET MACH POUR LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

Dans les zones où le sol est argileux, l'accentuation des sécheresses vient accentuer le phénomène de retrait-gonflement des argiles et entraîner des dommages importants aux chaussées et aux maisons individuelles.

Le retrait-gonflement des argiles (RGA) constitue le deuxième poste d'indemnisation en volume de la garantie «CatNat» (catastrophes naturelles), et c'est un poste en forte croissance. Cette pathologie concerne essentiellement les maisons individuelles et se situe «majoritairement dans une trentaine de départements du territoire français, dix départements présentent des projections de taux de croissance de plus de 10 % d'enjeux vulnérables au péril sécheresse à l'horizon 2040», d'après l'étude *Changement climatique et assurance à l'horizon 2040* publiée en décembre 2015 par la FFA (Fédération française de l'assurance) (1). Les bonnes pratiques, aussi bien dans le neuf que pour traiter les conséquences, sont détaillées dans les trois guides de l'Ifsttar (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) publiés en 2017 en partenariat avec le ministère



▲ Deux fissuromètres ont été mis en place pour suivre les fissures et les désordres.

de la Transition écologique et solidaire (2). Afin de traiter les conséquences du RGA sur les maisons individuelles, différentes solutions classiques existent (décrites dans le *Guide 3* de l'Ifsttar), comme la pose d'une géomembrane pour réduire les échanges hydriques entre le sol et les fondations, l'injection de résine expansive ou la reprise des fondations en sous-œuvre, par exemple avec des micropieux, afin de reporter en profondeur la charge du bâtiment.

(1) Ce document est téléchargeable sur www.ffa-assurance.fr.

Une nouvelle voie moins coûteuse et plus écologique est expérimentée avec le projet de recherche Mach (Maison confortée par humidification) piloté par le Cerema et financé par la DGPR (Direction générale de la prévention des risques), en partenariat de suivi avec l'AQC, Challenge Agriculture, le bureau d'expertise Elex qui a identifié la maison individuelle instrumentée et la MRN (Mission risques naturels). Cette maison située à Mer dans le Loir-et-Cher (41) s'est fissurée suite à la sécheresse de 2015 et n'a pas pu être indemnisée car la commune n'a pas été reconnue en «état de catastrophe naturelle» par l'État. La première étape du projet Mach a consisté à réaliser un état des lieux des désordres et de la végétation du site. Des sondages géotechniques ont été réalisés par le Cerema pour identifier la nature du sol de fondations, en particulier la nature des argiles et leur sensibilité au phénomène du RGA. Le principe est d'humidifier le sol lorsqu'il présente une teneur en eau faible et une succion (tension) >>>

(2) Ces guides sont téléchargeables sur www.ifsttar.fr.

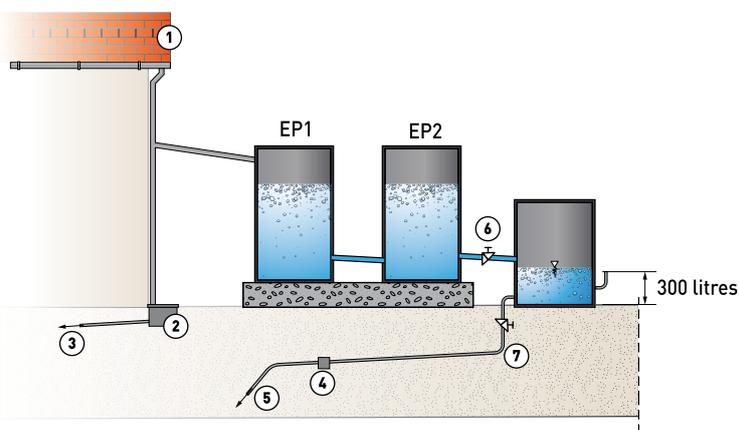


Photo © Cerema

Sonde tensiométrique et disposition au sol des points d'injection.

ILLUSTRATION N° 1

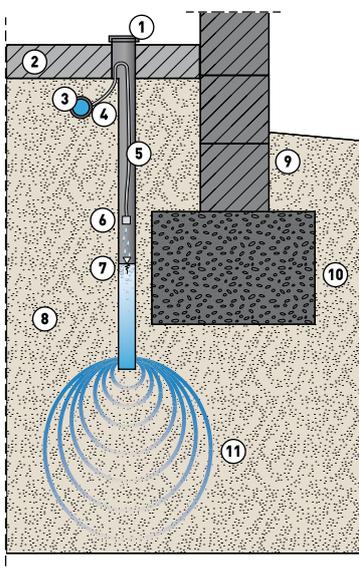
Schéma de récupération des eaux de pluie dans deux cuves de 800 litres chacune



- ① Toiture Mach
- ② Regard EP
- ③ Évacuation trop plein vers réseau EP public
- ④ Filtre
- ⑤ Vers points d'humidification
- ⑥ Vanne de remplissage
- ⑦ Vanne d'humidification

ILLUSTRATION N° 2

Schéma d'injection dans le sol des eaux de pluie récupérées



- ① Bouchon PVC
- ② Dalle béton
- ③ Alimentation eau
- ④ Capillaire
- ⑤ Tube PVC ø 5 cm
- ⑥ Gouteur
- ⑦ Niveau d'eau
- ⑧ Argile plastique (A3)
- ⑨ Soubassement (parpaings)
- ⑩ Semelle de fondation
- ⑪ Humidification progressive du sol

Source : Cerema Illustrations © Jean-Marc Lauby/AQC

élevée. La maison a été instrumentée avec une vingtaine de sondes tensiométriques enterrées jusqu'à un mètre de profondeur dans le sol, qui en mesurent en continu la succion. «Le sous-sol à proximité des façades endommagées est humidifié pendant la période de sécheresse avec des eaux pluviales qui sont stockées dans des cuves. Lors d'un pic de sécheresse matérialisé dans le suivi par un pic de succion, le propriétaire ouvre manuellement la vanne de la cuve tampon d'un volume de 300 litres pour permettre l'écoulement de l'eau dans le sol. L'eau s'écoule de manière gravitaire dans un réseau hydraulique sur une dizaine de points d'humidification situés autour des façades affectées», présente Lamine Ighil Ameur, docteur en Mécanique des sols au Cerema Normandie-Centre et chef de projet Mach.

L'expérimentation a été mise en place fin 2016, avec un retour sur trois saisons complètes de 2017 à 2019. Les fissures des façades endommagées n'ont pas été colmatées et leurs évolutions sont suivies par des fissuromètres. Le bilan montre qu'elles ont tendance à se rouvrir en période de sécheresse et se refermer en période de pluie mais elles sont globalement stabilisées grâce à la méthodologie d'humidification contrôlée mise en œuvre. Cette stratégie s'adapte à la réalité des épisodes de sécheresse grâce à ses trois types de suivi en continu et distant : tensiométrie du sol, fissurométrie et thermo-hygro-métrie atmosphérique. «En valorisant les eaux pluviales avec le projet Mach, nous misons sur une approche écologique en adéquation avec la stratégie du Cerema en faveur de l'adaptation au changement climatique. Pour le futur, nous voulons consolider les résultats en élargissant l'expérimentation sur davantage de configurations différentes, par l'instrumentation d'autres maisons touchées par le RGA», conclut Lamine Ighil Ameur. ■



Photo © Dragonale Concept

9

de ventilation naturelle donne aussi une autonomie en éclairage naturel, d'autant que la trame des salles de classe est fine avec une profondeur inférieure à sept mètres.

Une maquette physique a été testée pour la ventilation naturelle dans la soufflerie du laboratoire aérodynamique Eiffel. « Elle a aussi servi à tester la résistance cyclonique, ce qui a permis d'optimiser la structure en particulier sur la grande halle du gymnase, par rapport à une simple utilisation des abaques des Eurocodes », insiste Antoine Perrau. L'usage du béton a été réservé aux fondations et aux planchers préfabriqués mixtes acier-béton des étages inférieurs. Un effet induit de l'allègement de la structure est d'être avantageux pour la résistance sismique, en limitant les masses oscillantes. Une bonne conception en climat tropical humide passe par un confort thermique obtenu avec un contrôle des charges internes – en dimensionnant les équipements en fonction d'une estimation de l'occupation réelle des locaux – et avec une protection thermique de l'enveloppe, en particulier des brise-soleil fixes. « Il est particulièrement important en climat tropical de ne pas isoler le bâtiment de son environnement. Encore plus qu'en métropole, le contexte doit être étudié à une échelle élargie, tout particulièrement en milieu urbain. Il faut considérer l'ensemble de la chaîne de la ventilation naturelle depuis la source météorologique jusqu'à l'intérieur du bâtiment en passant par le relief et l'environnement proche. D'autant que la résilience dans le temps d'un bâtiment peut changer si le contexte urbain évolue. Un droit à la ventilation urbaine peut être décidé comme à Hong Kong après le SRAS en 2003 ou suivant un principe que j'ai mis en place avec l'agence LEU Réunion pour la conception de la ZAC Cœur de ville de La Possession à la Réunion, qui va jusqu'au droit à l'accès à la ventilation naturelle des bâtiments dans la trame urbaine », défend Antoine Perrau.

▲
9 Chantier KTR : la dalle a été équipée d'un plancher réversible dans lequel circule de l'eau provenant de sondes géothermiques.

Tirer parti de l'énergie géothermique

Pour rafraîchir de manière active sans polluer davantage la planète, l'énergie géothermique offre de nombreux atouts. Dans le cas du siège de KTR, la géothermie a été mise en œuvre avec un stockage inter-saisonnier. Quatre sondes géothermiques vont à 150 mètres de profondeur chercher une température à 13-14 °C constante toute l'année et la distribuer avec un circuit hydraulique dans des planchers réversibles. En été, les calories des locaux sont captées et stockées dans le sous-sol jusqu'à la période froide où elles seront exploitées pour le chauffage. Comme l'énergie géothermique est abondante et peu coûteuse, le bâtiment est très vitré avec plus de 25 % de vitrages par rapport à la surface au sol. Toutes les fenêtres y compris les grandes baies vitrées peuvent être ouvertes manuellement, offrant les bienfaits d'une ventilation naturelle. « La base de la démarche est la satisfaction des usagers que nous avons mesurée. La température intérieure demeure stable jour et nuit, sans consommer davantage d'énergie. On crée un îlot de fraîcheur et le plus beau est que la production d'énergie avec le solaire est supérieure à la consommation », sourit Marc Campesi. L'été, la consommation du bâtiment (essentiellement des petites pompes à chaleur) est effacée par la production des panneaux solaires hybrides couplée à un petit stockage par batterie. Sans être un projet low tech, la maintenance sera réduite car les équipements sont limités au circuit hydraulique primaire avec des pompes et des sondes géothermiques, deux mini PAC de 17 kW et un deuxième petit réseau hydraulique pour la distribution. Marc Campesi insiste sur l'importance de la pédagogie. La résilience passe aussi par la formation des usagers et leur appropriation d'un bâtiment étonnant qui ne peut que les transformer. ■