

SOLIDEO
SOCIÉTÉ DE LIVRAISON DES
OUVRAGES
OLYMPIQUES

EXCELLENCE ENVIRONNEMENTALE

Bilans & Perspectives

Novembre 2024

「
#LesBatisseuses
#LesBatisseurs
」

EXCELLENCE ENVIRONNEMENTALE

BILANS ET PERSPECTIVES

NOVEMBRE 2024



EDITO	5
PRÉAMBULE	6
LE PILOTAGE DE L'EXCELLENCE ENVIRONNEMENTALE	9
I. TENDRE VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE	
A. DES OUVRAGES AUX AMBITIONS FORTES ET EN ACCORD AVEC LES ENGAGEMENTS DE LA FRANCE	14
B. LE BILAN CARBONE : OUTIL PIVOT POUR LA STRATÉGIE	15
1. Le bilan carbone, sa méthode et son périmètre	15
2. Le périmètre du bilan carbone de la SOLIDEO	18
3. Se comparer à un scénario de référence	18
4. Définition des objectifs pour les promoteurs immobiliers	19
5. Comparaison avec le bilan carbone de la RE2020	20
C. UTILISATION DES LABELS EXISTANTS COMME LEVIERS DE PERFORMANCE	21
D. LES OUVRAGES AU RENDEZ-VOUS DES OBJECTIFS BAS CARBONE	22
1. Les résultats pour les produits de construction et équipements	22
2. Les résultats sur l'ensemble du cycle de vie	23
3. L'atteinte des labellisations bas-carbone	26
E. LES MATÉRIAUX ET DES TECHNIQUES BAS-CARBONE	27
1. Le bois sur le podium des matériaux durables	27
2. Les matériaux biosourcés et géosourcés se déclinent dans tous les lots	43
3. Le béton bas-carbone : un outil complémentaire à la réduction des émissions carbone de la construction	48
4. Des aménagements paysagers pensés pour la sobriété carbone	53
F. L'EXPLOITATION BAS-CARBONE	54
1. Viser la sobriété énergétique	54
2. Développer les approvisionnements en énergie bas-carbone	59
II. PROMOUVOIR L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE	
A. ECO-CONCEPTION ET CONCEPTION RÉVERSIBLE DES OUVRAGES OLYMPIQUES	70
1. Une candidature sobre en constructions	70
2. La réversibilité au cœur du projet du Village des Athlètes	72
3. Le Centre Aquatique Olympique : une piscine modulable	80
B. DES MATÉRIAUX CIRCULAIRES INTÉGRÉS À LA CONCEPTION	81
1. Des objectifs novateurs sur le réemploi	81
2. L'intégration de matériaux de réemploi dans les constructions neuves	81
C. DÉCONSTRUCTION SÉLECTIVE ET VALORISATION DES MATÉRIAUX	88
1. Dépose et réemploi des matériaux déconstruits	88
2. La valorisation des terres excavées in situ et ex situ	90
3. La valorisation du béton, des déchets de déconstruction et de chantier	91
4. Logistique optimisée et bas-carbone	92
D. PROGRAMMATION ET EXPLOITATION CIRCULAIRES DES OUVRAGES	94
1. Animer le cycle de l'eau dans les ouvrages	94
2. L'économie circulaire au service des futurs usagers	98
3. Créer les outils de l'économie circulaire du quotidien	98

III. PENSER LE CONFORT URBAIN EN 2050

A. DES OBJECTIFS QUI ANTICIPENT LE CLIMAT À 2050	102
1. Simuler le climat de 2050	102
2. Des objectifs quantitatifs pour les bâtiments	104
3. Des objectifs qualitatifs pour les espaces extérieurs	105
B. DES RÉSULTATS PROBANTS GRÂCE À UN SUIVI RENFORCÉ	105
1. Un suivi continu lors de toutes les phases de projet	105
2. Des ouvrages à la pointe des conditions de confort en 2050	106
C. LE VILLAGE DES ATHLÈTES, UN EXEMPLE : DU DESSIN URBAIN JUSQU'À LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS	107
1. Morphologie urbaine et simulations à l'échelle du quartier	107
2. Une conception bioclimatique des bâtiments	108
3. Les caractéristiques des logements : leviers de confort	109
4. Le réseau de froid indispensable à l'atteinte des objectifs	111
5. La simulation 3D : outil de vérification de la performance	112
6. Des espaces refuges dans les bâtiments et les équipements	117
7. Accompagner les usages	117
D. DES SYSTÈMES COMPLEXES POUR ASSURER LE CONFORT DANS LES SITES SPORTIFS ...	118
1. L'Arena Porte de la Chapelle : le choix du meilleur compromis	118
2. Le Grand Palais : compenser l'effet de serre	118
3. La couverture du court Suzanne Lenglen : la gestion du confort à ciel ouvert	119
E. ESPACES EXTÉRIEURS : LUTTER CONTRE LES ÎLOTS DE CHALEUR	120
1. Des choix de conception pour des lieux frais et confortables	120
2. La modélisation pour orienter les décisions et comprendre les phénomènes	120
3. Des solutions innovantes de lutte contre les îlots de chaleur sur le Village des Athlètes	121
4. La captation pour confirmer les hypothèses et préfigurer de nouveaux usages	122
F. DES AMBITIONS SANITAIRES FORTES NOTAMMENT CONCERNANT LA QUALITÉ DE L'AIR ..	125
1. Assurer un air sain dans les logements et équipements sportifs	125
2. Des innovations pour agir sur la qualité de l'air extérieur	129

IV. FAIRE DE LA VILLE UN SUPPORT DE BIODIVERSITÉ

A. RESTAURER ET CRÉER DES ÉCOSYSTÈMES	136
B. LA BIODIVERSITÉ AU CŒUR DE LA CONCEPTION URBAINE	137
1. Des continuités écologiques à toutes les échelles	137
2. Créer des sols fertiles	141
3. Transformer le bâti en support de biodiversité	146
C. DES ÉCOSYSTÈMES RICHES ET ÉQUILIBRÉS	151
1. La reconstruction d'habitats cohérents	152
2. Des habitats complexes et diversifiés	157
3. Des habitats adaptés aux espèces cibles	160
4. Le respect de la trame noire	162
D. PÉRENNISER LES HABITATS AVEC LES GESTIONNAIRES ET LES HABITANTS	164
SYNTHÈSE	167

EDITO



En se portant candidate pour les Jeux Olympiques et Paralympiques, Paris avait affiché une volonté inédite : se servir des Jeux comme d'un véritable levier d'accélération des projets de transformation écologique des villes hôtes.

Dès le 16 octobre 2018, le conseil d'administration de la SOLIDEO adoptait une stratégie d'excellence environnementale pour les ouvrages olympiques. Elle portait un objectif ambitieux, que beaucoup voyaient comme risqué : celui d'avoir 10 ans d'avance, en matière de construction, sur les accords de Paris relatifs à la lutte contre le réchauffement climatique. Cette stratégie était exemplaire, tant en matière de biodiversité, d'adaptation de la ville, et de promotion de l'économie circulaire. Ces engagements ont été tenus.

Durant les Jeux, le monde entier a pu admirer le savoir-faire de nos entreprises, conjuguant sobriété, qualité architecturale et maîtrise technique. Les Villages des athlètes et des médias, les équipements sportifs neufs ou rénovés, ainsi que les nouvelles infrastructures, ont fièrement témoigné d'une école française de fabrique de la ville.

Je ne peux donc qu'être fière du travail de la SOLIDEO et de toutes les parties prenantes — maîtres d'ouvrages, services de l'Etat, collectivités et entreprises — qui ont rendu possible ce défi extraordinaire. Je les remercie chaleureusement.

La SOLIDEO s'était engagée à restituer son expérience pour qu'elle devienne un héritage immatériel. Avec ce rapport, que je vous invite à lire, elle décrit la mise en œuvre de cette stratégie, présente ses principaux résultats, et souligne les immenses efforts qui ont été fournis. Ces pages offrent une ressource précieuse à tous ceux qui poursuivront la transformation et l'adaptation indispensables de nos villes.

Anne Hidalgo
Maire de Paris

Présidente du conseil d'administration de la SOLIDEO

PRÉAMBULE

Si, avec 70 ouvrages pérennes, l'héritage matériel des Jeux Olympiques et Paralympiques est conséquent, l'héritage immatériel l'est encore plus. La France a réussi à livrer tous ces ouvrages dans les temps et dans les budgets. C'est la première fois qu'un pays organisateur tient cette double contrainte. Et la France fit bien plus : conformément aux ambitions fixées en 2018, les ouvrages olympiques constituent une réelle vitrine de l'excellence française dans l'art de bâtir au XXI^e siècle.

Face aux grands défis climatiques, énergétiques et environnementaux contemporains, la SOLIDEO, consciente de sa responsabilité et de son impact en tant qu'aménageur, a conçu et réalisé, en collaboration avec l'ensemble des maîtres d'ouvrage, la ville frugale et résiliente dont nous avons impérativement besoin.

Quatre enjeux environnementaux majeurs ont été identifiés. Pour chacun d'eux, les projets olympiques apportent des propositions de réponses et des retours d'expérience qui dessinent les contours de la ville européenne de demain, affirmant une singularité française dans l'histoire des Jeux et offrant une vitrine exceptionnelle au savoir-faire national dans les filières de l'aménagement et de la ville.

1 VERS LA VILLE POST-CARBONE : QUELLE ÉTAPE EN 2024 ?

En matière d'atténuation du changement climatique, les ouvrages olympiques s'inscrivent résolument dans une démarche de réduction de l'impact carbone de leur construction, ainsi que sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ils donnent à voir, dès 2024, une étape ambitieuse sur la trajectoire vers la neutralité carbone à l'horizon 2050. L'opération d'aménagement du Village des Athlètes présentera ainsi une réduction de 47% de son impact carbone par rapport à une opération standard de 2019, et ce, sur un cycle de vie de 50 ans. Dans l'approche, un budget carbone exigeant a été alloué à chaque bâtiment et l'impact carbone a ensuite été réellement compté à toutes les étapes de la construction, des terrassements jusqu'aux équipements intérieurs en passant par le coulage des bétons du gros oeuvre. Nous avons accordé la même importance à l'impact carbone lié à la construction et à celui de l'exploitation du bâtiment. Cette attention permanente à l'impact sur le changement climatique, et les résultats obtenus, font des ouvrages olympiques un véritable jalon dans la trajectoire bas-carbone de la filière française de la construction (architectes, bureaux d'études, promoteurs, constructeurs...). C'est la preuve tangible que celle-ci est aujourd'hui prête à atteindre, avec dix ans d'avance environ, les objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC).

2 VERS L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES : QUEL MÉTABOLISME URBAIN ?

L'approche circulaire préside à chaque étape des projets, de la déconstruction sélective jusqu'à la mise en œuvre de matériaux issus du réemploi. 96% des matériaux générés par la déconstruction sur le Village des Athlètes ont ainsi été orientés vers des filières de valorisation. Les ouvrages olympiques constituent par leur ampleur un catalyseur inédit pour l'économie circulaire et la généralisation de la démarche de réemploi à l'ensemble des projets urbains.

3 VERS UN NOUVEAU CLIMAT : QUEL CONFORT URBAIN EN 2050 ?

Tous les projets supervisés par la SOLIDEO prennent en compte la réalité du changement climatique et la nécessaire adaptation de la ville. Les simulations thermiques réalisées à chaque étape des projets ont permis d'orienter les choix de conception et d'assurer le confort des occupants des logements, bureaux et équipements. Ainsi, sous le climat de 2050, les périodes d'inconfort n'excéderont pas 3% du temps d'occupation au sein des ouvrages. Par ailleurs, le Village est déjà adapté au climat de 2050, sans climatisation. Cette systématisation de l'intégration du climat futur dans la conception est une démarche

inédite à cette échelle. En préfigurant le volet adaptation de la RE2020, elle a stimulé d'importantes évolutions méthodologiques au sein de la filière.

4 VERS LA 6^{ÈME} EXTINCTION DE MASSE : QUELLE BIODIVERSITÉ URBAINE ?

Dans le contexte spécifique de zones densément urbanisées, les ouvrages olympiques sont démonstrateurs d'une stratégie d'amplification de la biodiversité à grande échelle. En travaillant sur les sols, les continuités écologiques, les palettes végétales et leur adaptation à l'environnement et au climat, les projets sont conçus comme des écosystèmes urbains complets suffisamment complexes pour être durablement résilients et favoriser la coexistence harmonieuse de l'humain et de la nature.

Afin de répondre à ces quatre enjeux, la SOLIDEO a aussi choisi l'innovation.

Les ouvrages olympiques donnent à voir plusieurs innovations de rupture. Ces projets, aux surcoûts financés par le Fonds Innovation et Ecologie de la SOLIDEO, font la démonstration de systèmes constructifs jamais éprouvés, proposent des solutions techniques directement issues de la recherche et développement, au niveau des matériaux,

de l'énergie, du traitement de l'air ou de l'eau, du recyclage... Si leur niveau de maturité n'ont pas toujours permis de les réaliser dans les délais des Jeux, le travail de conception réalisé permet dans tous les cas d'en tirer des enseignements en vue de futures réalisations. Dans des délais très contraints et dans une économie classique de la construction, les ouvrages olympiques ont réussi à massifier et généraliser des procédés éprouvés à plus petite échelle, démontrant ainsi leur maturité. C'est par exemple le cas de techniques constructives faisant appel au bois, en structure ou en façade.

Dans ce contexte, la SOLIDEO documente les projets menés dans une logique de retour d'expérience et souhaite laisser en héritage des clés de compréhension des réussites et des obstacles rencontrés autour des ouvrages olympiques.

Au lendemain des Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP), alors que les travaux de reconversion des bâtiments et des Villages pour l'héritage s'apprentent à débiter, le présent document constitue un premier bilan de la mise en œuvre de la stratégie d'excellence environnementale adoptée par le conseil d'administration de la SOLIDEO en 2018. Il sera mis à jour à la fin du premier semestre 2025 en intégrant les dernières données disponibles.



Yann Krynski
Directeur général exécutif



Antoine du Souich
Directeur de la stratégie et de l'innovation



LE PILOTAGE DE L'EXCELLENCE ENVIRONNEMENTALE

UNE ACTION FONDÉE SUR DES ORIENTATIONS STRATÉGIQUES AMBITIEUSES ET PIONNIÈRES

En application de l'Accord de Paris entré en vigueur en 2016, la France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone en 2050. Selon le GIEC, cet objectif implique une diminution très rapide des émissions de gaz à effet de serre (GES) au cours de la prochaine décennie, de l'ordre de 45 % en 2030 par rapport à 2010. Il ne peut être atteint que par un changement radical des manières d'aménager, de construire et de gérer la ville.

Dans la continuité de la candidature de Paris pour l'organisation des Jeux de 2024 qui insistait sur la nécessité de transformer radicalement la manière d'organiser les Jeux Olympiques et Paralympiques, le comité d'organisation s'est engagé à réaliser les premiers Jeux alignés sur l'Accord de Paris.

Ainsi, Paris 2024 s'est fixé l'objectif de diviser par deux l'empreinte carbone des Jeux par rapport à la moyenne des éditions de Londres 2012 et Rio 2016. Paris 2024 a choisi de prendre en compte toutes les émissions carbone de l'événement (scopes 1, 2 et 3), directes et indirectes, incluant le déplacement des spectateurs. En excluant l'édition de Tokyo 2020 organisée sans spectateurs, l'empreinte carbone moyenne des dernières éditions des Jeux s'établit à 3,5 millions de tonnes équivalent carbone (tCO₂eq). Afin d'atteindre l'objectif de division par deux des émissions par rapport aux Jeux précédents, des actions de réduction ont été mises en œuvre dans tous les pans de l'organisation des jeux : construction, énergie, restauration, transports, aménagement et numérique.

C'est dans ce contexte que la SOLIDEO s'est dotée dès 2018 d'une stratégie d'excellence environnementale aux ambitions fortes. Elle s'applique à l'ensemble des projets sous maîtrise d'ouvrage directe de la SOLIDEO et sous maîtrise d'ouvrage des autres maîtres d'ouvrages, publics ou privés, qu'il s'agisse d'opérations neuves ou de rénovation.

Le conseil d'administration de la SOLIDEO, qui regroupe l'ensemble des parties prenantes engagées dans la préparation des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024, lors de sa réunion du 16 octobre 2018, a mis l'accent sur plusieurs priorités :

- apporter des réponses concrètes aux grands défis mondiaux que représentent le défi climatique, la 6^{ème} grande extinction des espèces et l'épuisement des ressources ;
- s'inscrire dans la poursuite des ambitions internationales, françaises, régionales et locales définies au travers de différents documents cadres : Accord de Paris, Objectifs de Développement Durable des Nations Unies, les plans climat nationaux et européens, la Stratégie Nationale Bas Carbone ;
- construire un héritage environnemental matériel et immatériel, en accélérant la transition écologique des territoires ;
- offrir une vitrine exceptionnelle au savoir-faire français, entraîner le développement des filières françaises de l'aménagement et de la construction ;
- affirmer une « singularité » française, dans l'histoire des Jeux.

Le conseil d'administration a adopté à l'unanimité une stratégie environnementale qui se déclinait en trois principales ambitions :

- **Ambition 1** : Objectif neutralité carbone à horizon 2050. La stratégie engageait la SOLIDEO à fixer des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble des postes émetteurs et sur l'ensemble du cycle de vie des ouvrages. C'est ce que nous avons appelé le « budget carbone », avec un objectif cible de -50% de CO₂eq émis en prenant en compte le cycle de vie et 50 ans d'exploitation, à adapter à chaque projet.

- **Ambition 2** : Garantie de confort urbain sous le climat 2050. Les constructions pérennes ayant une durée de vie d'au moins une centaine d'année, il était nécessaire de prendre en compte, dès la conception, les changements climatiques, en recherchant l'adaptation et la résilience des territoires et des infrastructures, en garantissant aux populations un confort urbain et des conditions sanitaires optimales.

- **Ambition 3** : Contribution positive du projet urbain à la biodiversité. Les ouvrages et les espaces publics devaient être conçus dans un souci de préservation, de renforcement et de valorisation des écosystèmes urbains, des habitats et des espèces cibles.

DÉFINITION DES OBJECTIFS PAR PROJET

Une des clés de réussite de cette ambition a été la fixation, très en amont des projets et pour chacun d'entre eux, des objectifs environnementaux. La SOLIDEO s'est appuyée pour cela sur les travaux conduits au titre de la supervision, et en particulier, en 2018-2019, sur l'analyse de la programmation des ouvrages olympiques. Un groupement d'assis-

tance à maîtrise d'ouvrage environnementale nommé HYSPLEX (Une autre ville, Amoès, Elioth, Trans-Faire) a été désigné pour 6 ans. Il lui a été confié plusieurs missions :

- L'animation d'un comité scientifique ;

- la réalisation d'études de diagnostic et de benchmark, en particulier concernant la faisabilité des objectifs carbone ;

- la rédaction de prescriptions environnementales pour les consultations de promoteurs des deux Villages ;

- l'audit des bilans carbone, des simulations thermiques et de la tenue des engagements environnementaux (labels, etc.) à toutes les étapes de conception et à la réception.

CONTRACTUALISATION DES OBJECTIFS

La stratégie d'excellence environnementale définie par la SOLIDEO a été ainsi déclinée à l'échelle de chaque ouvrage dans le cadre des conventions d'objectifs tripartites liant la SOLIDEO, Paris 2024 et les maîtres d'ouvrages. Elle spécifie les objectifs à atteindre ou à viser selon les trois ambitions : budget carbone maîtrisé, confort urbain à horizon 2050, sauvegarde et valorisation de la biodiversité.

Lors de chacune des consultations d'entreprises (DCE) lancées par un maître d'ouvrage public, l'ensemble de ces objectifs ont été annexés à la consultation ainsi qu'une Charte Environnementale d'Organisation et de Logistique Chantier (CEOLC).

Ce positionnement clairement affiché par la SOLIDEO, argumenté techniquement, et inscrit dans le marbre des contrats, a eu pour conséquence l'intégration dans toutes les

équipes des projets, depuis la conception jusqu'à la livraison, de compétences environnementales fortes, capables de prendre la mesure des objectifs et de peser sur les choix opérationnels.

SUIVI ET ACCOMPAGNEMENT DES PROJETS

En 2019, la SOLIDEO a créé la Direction de la Stratégie et de l'Innovation (DSI) dont le rôle était la coordination de la mise en œuvre de l'ensemble des ambitions décidées par le conseil d'administration. Elle a constitué un pôle de compétences techniques pour l'ensemble des opérations, supervisées ou en maîtrise d'ouvrage SOLIDEO. En raison du caractère systémique de l'ambition de la SOLIDEO, ses domaines de compétence étaient nombreux : les modes constructifs, les matériaux, l'énergie, l'économie circulaire, la biodiversité, l'accessibilité universelle, l'économie sociale et solidaire, l'insertion professionnelle, les relations avec les partenaires sociaux, le droit du travail, la santé et la sécurité sur les chantiers, l'innovation.

Les différentes étapes de rendus des consultations de promoteurs immobiliers pour le Village des Athlètes, comme celles des principaux projets supervisés (Arena et CAO) ont constitué un premier révélateur de la faisabilité technique et économique des ambitions environnementales de la SOLIDEO. La SOLIDEO a construit des outils méthodologiques et les a mis à disposition des maîtres d'ouvrage (tels qu'un scénario climatique en climat actuel et sous le climat de 2050 du territoire de l'ouvrage ou encore une méthodologie bilan carbone). De nombreux ateliers de conception ont été réalisés avec les groupements de maîtrise d'œuvre, notamment pour le Village des Athlètes.

Pendant la vie des projets, la SOLIDEO a mis en place un dispositif d'échange et d'évaluation continue, en particulier avec les promoteurs immobiliers, qui a permis d'anticiper des difficultés et de lever les éventuels verrous, en particulier pour ce qui concerne la construction bois, les systèmes énergétiques, le confort d'été en phase jeux et héritage, et le réemploi. Elle a mobilisé à cet effet de nombreux acteurs (le CSTB, l'Agence qualité construction, France Bois 2024, le CEREMA, le Booster du Réemploi, et d'autres) dont les contributions en partenariat avec la SOLIDEO participent à son héritage immatériel.

Dans le cadre de la fonction de supervision de la SOLIDEO, lors des comités de programme et de pilotage, des revues de projets mensuelles, et à l'occasion des avis rendus à chaque jalon de projet, un point de situation sur la bonne prise en compte des objectifs environnementaux était systématiquement réalisé. En phase chantier, des visites environnementales de site ont été réalisées pour accompagner les entreprises dans une conduite ambitieuse et responsable des chantiers au regard des objectifs environnementaux.

Lors de la double phase de réception des ouvrages (en phase jeux et en phase héritage), l'atteinte des objectifs environnementaux est évaluée. À partir des données collectées lors de ces évaluations, la SOLIDEO met en forme les retours d'expérience et valorise les acquis techniques et méthodologiques de ces projets. Le présent document en est l'une des traductions concrètes. Toute la documentation est disponible sur le site héritage de la SOLIDEO :

www.ouvrages-olympiques.fr



**TENDRE VERS
LA NEUTRALITÉ
CARBONE**

LA TRAJECTOIRE VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE

A. DES OUVRAGES AUX AMBITIONS FORTES ET EN ACCORD AVEC LES ENGAGEMENTS DE LA FRANCE

La SOLIDEO a instauré pour l'ensemble des ouvrages olympiques pérennes une stratégie de réduction de leur impact carbone sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Les objectifs ainsi définis s'inscrivent dans la SNBC et la loi Énergie Climat, qui définissent la trajectoire vers la neutralité carbone à l'horizon 2050 pour la France, avec l'objectif d'avoir 10 ans d'avance sur la réglementation.

La SOLIDEO a agi sur la diminution des émissions de GES en accélérant la décarbonation des activités de construction et de rénovation. À travers sa stratégie d'excellence environnementale, elle a activé en effet plusieurs leviers présentés dans la SNBC :

- rénovation du bâti existant pour réduire les consommations énergétiques ;
- sobriété des usages pour limiter les consommations énergétiques ;
- décarbonation des consommations résiduelles ;
- hauts niveaux de performance carbone et énergétique pour les constructions neuves.

Elle a participé au développement d'une ville décarbonée à long terme en systématisant une conception bioclimatique des ouvrages en utilisant des matériaux peu carbonés et en encourageant l'utilisation des mobilités douces et des transports en commun pour les déplacements à travers la conception des espaces publics et en réalisant des infrastructures permettant un approvisionnement énergétique durable pour le Village des Médias et le Village

des Athlètes (l'utilisation d'un réseau de chaleur et de froid basé sur plus de 68% d'énergie renouvelables). La SOLIDEO a systématiquement mis en œuvre la planification écologique des collectivités locales et développé des solutions à destination des futurs habitants pour réduire leur impact carbone.

Dans une moindre mesure compte tenu de la nature de ses projets, la SOLIDEO a recherché la séquestration de dioxyde de carbone dans des puits biologiques ou technologiques (c'est-à-dire tout système qui absorbe plus de carbone qu'il n'en émet). L'utilisation de bois provenant de forêts labellisées FSC ou PEFC (gestion durable des forêts) garantit le renouvellement du stock de carbone et la reconstitution des sols en respectant l'histoire géologique des milieux et des habitats. Sur le Village des Athlètes et le Village des Médias, la SOLIDEO a augmenté la part d'espaces verts par rapport à une conception classique pour un quartier de cette densité ainsi que le nombre d'arbres plantés.

Cette stratégie s'est traduite concrètement, pour l'ensemble des ouvrages olympiques et paralympiques, par la définition d'un "budget carbone". Il fixe un plafond carbone en valeur absolue en tonnes de CO₂ équivalent. Pour l'établir, un scénario de référence (voir page 18) avait préalablement été défini pour chaque mode constructif et chaque typologie. Ce scénario correspondait aux standards en 2019 du secteur de la construction, conforme à la réglementation thermique et construit avec une structure en béton. Pour chacun des ouvrages, la SOLIDEO a déterminé

d'une part un budget carbone « socle » correspondant à un niveau maximal à ne pas dépasser et d'autre part un budget carbone dit « innovant », plus faible, correspondant à une cible à viser pour le maître d'ouvrage. En fonction des typologies d'ouvrages et des leviers disponibles en matière de bilan carbone, la réduction entre l'objectif « socle » et le scénario de référence varie entre 10% (infrastructures, aménagements paysagers) et 50% (lots immobiliers du Village des Athlètes, Centre Aquatique Olympique).

La responsabilité du respect du budget carbone revient à chacun des maîtres d'ouvrage, en utilisant une méthode d'évaluation commune, adaptée de la démarche E+C- et imposée par la SOLIDEO. L'évaluation à chaque étape du projet du bilan carbone des opérations d'aménagement, de construction et de rénovation selon cette méthode a permis d'adapter les choix de conception, de mise en œuvre opérationnelle ou de matériaux pour maintenir la trajectoire définie et atteindre l'objectif fixé. Le bilan carbone était un outil commun à tous les maîtres d'ouvrage, conforme à la réglementation, et basé sur la vérification par des tiers.

B. LE BILAN CARBONE : OUTIL PIVOT POUR LA STRATÉGIE

Le bilan carbone intègre chaque phase de la vie des projets : conception, chantier, exploitation, fin de vie.

1. Le bilan carbone, sa méthode et son périmètre

La méthodologie carbone utilisée s'appuie sur les principes de l'analyse de cycle de vie (ACV). L'ACV est une méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un produit, d'un service, d'un procédé, sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son traitement en fin de vie. Outil normalisé et reconnu, l'ACV est une méthode d'évaluation globale et multicritère, résultant de l'interprétation du bilan quantifié des flux de matières et d'énergies entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie du produit.

Aujourd'hui deux normes ISO constituent le socle normatif fondamental de l'ACV :

- NF EN ISO 14040 octobre 2006 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre ;
- NF EN ISO 14044 octobre 2006 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.

La réalisation d'un bilan carbone est une ACV réalisée sur la base de l'indicateur CO₂ équivalent et permet de quantifier les émissions de GES générées par l'ensemble du cycle de vie d'un bien ou d'un service. Pour le réaliser, seuls les postes d'émissions directes (scope 1) (au sens qu'elles sont directement maîtrisées par l'aménageur) et indirectes (scope 2) sont pris en compte :

- émissions liées à la construction des bâtiments et espaces publics (prise en compte de la déconstruction des ouvrages existants) ;
- émissions liées à la consommation d'énergie et d'eau pendant la durée de vie du quartier (bâtiments et espaces publics).

La SOLIDEO a fait le choix d'exclure du périmètre les émissions indirectes liées à la gestion des déchets en phase exploitation et aux déplacements quotidiens des personnes. Le poste transport dépend très fortement de variables qui ne sont pas directement liées à l'aménagement du quartier. L'aménagement de ce quartier peut cependant lancer une dynamique pour que ses usagers soient plus à même de se diriger vers les modes de transport doux (diminuer le nombre de places de parkings, aménager l'espace public du quartier pour favoriser les déplacements à vélo et à pied etc.) et peut également permettre à la ville de développer son réseau de transports en commun.

Les émissions liées à la construction des bâtiments ont été calculées selon deux méthodes :

- Pour les produits de construction (lots 1 à 7), des ratios existants ont été appliqués pour estimer les quantitatifs de produits et matériaux à mettre en œuvre. Ces quantitatifs ont ensuite été associés à des facteurs

d'émissions pour définir le budget carbone maximal de chacun des lots ;

• En ce qui concerne les équipements (lots 8 à 12), les bases de données existantes étaient, et sont toujours, trop faiblement alimentées pour utiliser la même méthode. Des valeurs de référence d'émission de carbone issues du référentiel E+C- ont été utilisées telles quelles pour forfaitiser les seuils carbone de ces lots.

L'impact carbone de la construction ayant été évalué au travers des calculs E+C- et dans le prisme de la future RE2020, la méthodologie retenue a défini la base INIES comme base de données par défaut pour la réalisation des études et des calculs de réception. Cependant, pour limiter le recours à des données environnementales peu représentatives de la réalité des projets, le recours à des configurateurs a été encouragé : Betie pour le béton, Save construction pour l'acier et DE-Bois pour le bois, en particulier pour les lots structurels.

L'évolution de la réglementation a rendu obligatoire l'utilisation de la méthode définie dans la norme NF EN 15804 pour toutes les nouvelles déclarations environnementales. Les facteurs d'émissions utilisés dans les calculs sont issus de données de l'ADEME (Agence de développement de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et de données conventionnelles E+C- pour ce qui concerne l'énergie et les équipements associés.

Pour le calcul des impacts environnementaux des composants et services, la méthode utilise différents types de données d'entrée mises à disposition sur la base de données de référence INIES :

- Les Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) et les Profils Environnementaux du Produit (PEP) individuelles sont produites par un fabricant unique pour un produit de construction particulier et identifié dans son propre catalogue.
- Les FDES et PEP collectives sont des fiches quant à elles produites par un syndicat de professionnels sur la base de données tirées d'un échantillon représentatif du même produit fabriqué par un collectif de fabricants.

- Les Modules de Données Environnementales Génériques par Défaut (MDEGD) sont des données génériques à utiliser uniquement en l'absence de donnée plus spécifique car elles comportent une majoration des impacts environnementaux de l'ordre de 30% par application de coefficients de sécurité.

Dans la méthodologie SOLIDEO, la sélection des différents types de fiches suit la méthode de priorisation renseignée pour l'évaluation E+C- à savoir :

Priorisation des fiches de données INIES



À l'aide de ces données sur divers produits et équipements, l'ACV du contributeur produits et équipements d'un bâtiment est réalisée en faisant la somme des différents éléments qui constituent l'ouvrage étudié. Toutefois, le développement de FDES individuelles est encore trop coûteux pour les fabricants de

produits, en particulier pour les produits de niche. L'utilisation de fiches par défaut ne met ainsi pas en lumière ces gains carbone et n'encourage pas les concepteurs à avoir recours à des matériaux moins carbonés puisqu'insuffisamment mis en valeur.

Phases comptabilisées dans l'analyse du cycle de vie des produits de construction et équipements

Phase de PRODUCTION	Phase de CONSTRUCTION	Phase d'UTILISATION	Phase de FIN DE VIE	Avantages et charges au-delà du système
Acquisition matières premières, Transport, fabrication	Transport, processus de construction - installation	Utilisation, entretien, réparation, remplacement, réhabilitation	Déconstruction, transport, réutilisation / recyclage, élimination	Potentiel de réutilisation, récupération, recyclage
Modules A1 à A3	Modules A4 à A5	Modules B1 à B5	Modules C1 à C4	Module D

Le module D présente les bénéfices pour l'environnement hors du système, c'est-à-dire le potentiel de production de matières secondaires ou de combustibles à la suite à d'opérations de récupération ou de recyclage en fin de vie.

En méthode E+C-, le module D n'est pas inclus dans le calcul de la contribution du produit aux impacts sur le réchauffement climatique lors du calcul du « total cycle de vie ». En revanche, il rentre en compte dans le calcul de l'indicateur Eges, en kgCO₂eq/m²SDP, sans prise en compte de la quantité effective de produits.

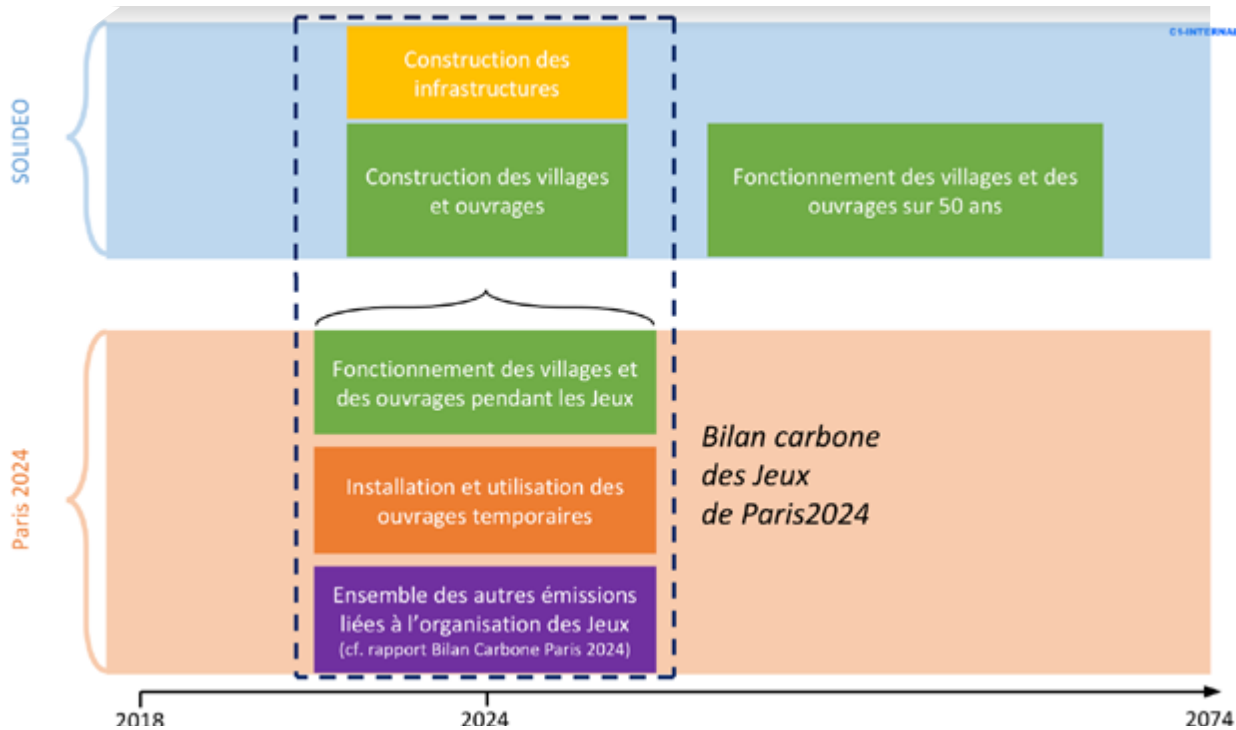
Cependant, la nouvelle réglementation RE2020 inclut bien ce module dans le calcul du cycle de vie de chaque produit, ce qui permet de mesurer directement l'impact des efforts de conception pour la réutilisation et le recyclage. Il s'agit d'un outil puissant pour les concepteurs qui souhaitent compenser une partie des impacts sur le réchauffement climatique de leur bâtiment par le choix de composants avec des bénéfices élevés et notamment les matériaux biosourcés.

De fait, les calculs effectués par la SOLIDEO en méthode E+C- prennent mal en considération ces bénéfices qui auraient pu compenser une partie des émissions du bâtiment.



Tuiles de la Halle Maxwell

2. Le périmètre du bilan carbone de la SOLIDEO



Périmètre du bilan carbone de la SOLIDEO

Le bilan carbone SOLIDEO prend en compte l'ensemble des ouvrages permanents réalisés dans le cadre de la préparation des JOP et exclut *de facto* tous les ouvrages provisoires prévus exclusivement pour la phase Jeux et

qui sont à la charge de Paris 2024. Le bilan carbone des ouvrages de la SOLIDEO est donc partie intégrante du bilan carbone des Jeux qui sera publié par Paris 2024.

3. Se comparer à un scénario de référence

Afin de positionner les niveaux de performance atteints par les ouvrages olympiques par rapport à la construction française standard, une valeur carbone de référence a été définie en 2019 pour chaque projet : piscines, gymnases, infrastructures, bâtiments de logement ou de bureau. Elle correspond à un « bâtiment standard », conforme à la réglementation thermique RT2012. Pour les bâtiments neufs, elles ont été calculées sur la base de retours d'expériences à partir des résultats du programme « OBEC » (Objectif Bâtiment Energie Carbone, dispositif de soutien de l'ADEME à l'expérimentation E+/C-) et d'opérations variées suivies par le groupement d'assistance à maîtrise d'ouvrage HYSPLX.

Sur les deux Villages, les caractéristiques suivantes sont considérées pour définir le scénario de référence :

- R+1 / R+3 : façades et refends béton, plancher béton ;
- R+4/R+8 : poteaux/poutres/noyau béton, plancher béton ;
- R+9 et plus : poteaux/poutres béton/noyau, plancher béton.

Un récapitulatif de l'impact carbone de la conception classique des ouvrages est présenté dans le tableau.

Emissions de carbone des bâtiments selon les différents lots pour les scénarios classiques

	Scénario classique R+1 - R+3	Scénario classique R+4 - R+8		Scénario classique R+9	
	Non résidentiel	Résidentiel	Non résidentiel	Résidentiel	Non résidentiel
Impact carbone PCE (kgCO ₂ eq/m ² SDP) sans parking	960	950	1220	945	1215

N.B : La typologie de bâtiments R+9 et plus correspond aux bâtiments de plus de 28 mètres.

Les parkings en infrastructure et le lot 13 correspondant aux équipements locaux de production d'électricité (panneaux photovoltaïques notamment) ne sont pas inclus dans ces seuils. Pour obtenir le seuil applicable à un projet, la SOLIDEO a ajouté un forfait de 5 tCO₂eq par place de stationnement en infrastructure. Le lot 13 reste considéré à part. Ce forfait correspond à l'impact carbone moyen d'une place de stationnement de 20 m² réalisée en béton bas carbone.

4. Définition des objectifs pour les promoteurs immobiliers

Les grands leviers d'action pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre des produits et équipements de constructions des bâtiments sont :

- un mode constructif utilisant des matériaux biosourcés (majoritairement du bois).
- l'allègement maximal de la structure pour diminuer la quantité de béton utilisée pour les fondations, en privilégiant l'ossature bois à des systèmes plus pondéreux ;
- la sobriété des éléments de second-œuvre ;
- des approvisionnements le plus possible à proximité des chantiers.

Ainsi, en amont des phases de conception (avant l'étape concours), des scénarios «cibles» ont été décrits par la SOLIDEO et leur faisabilité étudiée par sa maîtrise d'œuvre urbaine :

- R+1/R+3, planchers bas 80% béton bas carbone, 20% béton standard, autres planchers bois, façades bois. Le scénario «cible» permettrait de réduire de presque 50% les émissions de carbone de la construction

des équipements R+1/R+3, par rapport au scénario de référence

- R+4/R+8 : mode constructif poteaux/poutres/noyau bois, planchers bas 80% béton bas carbone, 20% béton standard, autres planchers bois, façades bois. Le scénario «cible» permettrait de réduire les émissions de carbone de la construction de 50% pour les bâtiments résidentiels et de 44% pour les bâtiments non résidentiels.

- La typologie de bâtiments R+9 et plus généralement les bâtiments dont la hauteur du dernier plancher est supérieure à 28 mètres. Au-delà de cette hauteur, l'application par les services de protection civile de la réglementation incendie est plus contraignante. Pour un bâtiment en structure bois de cette hauteur, la conception et l'exploitation du bâtiment, en particulier pour les logements, s'écartent du cadre classique pour un immeuble de moyenne hauteur, en devant respecter des dispositions en général réservées aux immeubles de grande hauteur, comme le sprinklage, la fermeture des portes automatiques, des contrôles réguliers, etc. De ce fait, le recours au bois et aux

matériaux biosourcés en structure sur cette typologie de bâtiment entraîne en général des conséquences économiques prohibitives.

Le scénario “cible” R+9 était basé en conséquence sur les matériaux suivants : planchers, façades et infrastructure en 50% béton bas carbone et 50% béton standard, poteaux/poutre/noyau en béton standard.

Le scénario «cible” permettait de réduire les émissions de carbone de la construction des bâtiments résidentiels et non résidentiels

respectivement de 30 et 27% par rapport au scénario classique de référence.

Concernant le volet énergétique, les scenarii “cibles” prenaient en compte à la fois la performance énergétique des bâtiments, et donc l’estimation de leurs consommations, ainsi que les sources d’approvisionnement et leurs facteurs d’émissions. Le scénario énergétique, défini ci-dessous, utilisé pour définir l’objectif à atteindre correspond à une réduction de 67% des émissions de GES du projet par rapport à la référence.

Scenarii de consommation et approvisionnement énergétique du Village

Scénario	Scénario de référence	Scénario projet
Performance énergétique	RE2020 (BEPOS Effinergie +)	RE2020 (BEPOS Effinergie +)
Approvisionnement en énergie	Gaz	Géothermie Thermofrigopompes Raccordement réseaux existants
Couverture des consommations électriques par le photovoltaïque	0%	De 20 à 25%

5. Comparaison avec le bilan carbone de la RE2020

Le dépôt des permis de construire des principaux ouvrages olympiques ont précédé de 18 mois l’entrée en vigueur, en janvier 2022, de la nouvelle réglementation énergétique 2020 (RE2020), dont les règles générales n’avaient pas été énoncées. En particulier, les permis de construire ont été déposés par les opérateurs immobiliers à l’été 2020 pour le Village des Athlètes et au printemps 2021 pour le Village des Médias.

Le bilan carbone demandé par la RE2020 correspond au même périmètre et s’appuie sur les mêmes données de base que la méthodologie mise en place par la SOLIDEO.

Il en diffère cependant sur deux points :

- la mise en place de l’analyse de cycle de vie dynamique¹, qui va dans le sens de la promotion de la performance carbone des

matériaux biosourcés, et notamment le bois, largement présent dans les modes constructifs retenus sur le Village des Athlètes mais dont l’impact en matière de stockage temporaire de carbone n’a en conséquence pas été spécifiquement recherché ;

- la mise en place de valeurs plafonds, en particulier pour les infrastructures et de coefficients.

En raison de ces différences de méthode, la correspondance entre la RE2020 et les objectifs de la stratégie d’excellence environnementale de la SOLIDEO n’est pas triviale et varie d’un immeuble à un autre. Ils correspondent en moyenne suivant les projets aux niveaux de la RE2020 aux échéances 2028 ou 2030, confirmant bien, pour des permis obtenus en 2020, l’objectif d’avoir 10 ans d’avance sur la réglementation.

1 - L’analyse de cycle de vie dynamique consiste à prendre en compte la pondération de l’impact des différentes étapes du cycle de vie d’un matériau en fonction de l’année (réelle) des émissions de GES. Plus une émission a lieu tôt, plus son impact est important. Ainsi, les émissions du bois ayant lieu à la fin de la vie du bâtiment après un stockage sur toute sa durée de vie, sont pondérées à la baisse par rapport aux émissions réalisées lors de la construction, notamment en ce qui concerne le béton.

C. UTILISATION DES LABELS EXISTANTS COMME LEVIERS DE PERFORMANCE

Les opérations relevant du résidentiel, du tertiaire ou scolaire ont été tenues de s’inscrire dans des démarches de référentiels pertinentes telles qu’E+C-, Bâtiment à Énergie Positive et Réduction Carbone et/ou BBCA, Bâtiment Bas Carbone, à partir desquelles la SOLIDEO et les maîtres d’ouvrage ont fixé des objectifs spécifiques, qui correspondaient aux scenarii “cible”.

À titre d’exemple, les bâtiments de logements du Village des Athlètes devaient atteindre, en fonction de leur hauteur, les niveaux E3C1, ou E3C2. Les groupes scolaires de Saint-Ouen et de Dugny avaient pour objectif le niveau E3C2, tandis que les ouvrages sportifs complexes comme l’Arena de la Porte de la Chapelle ou la Marina de Marseille devaient viser le niveau E3C1.

L’engagement de recours à la labellisation BBCA a garanti pour la SOLIDEO la réalisation d’un bilan carbone conforme aux prescriptions (justificatifs, contrôle, etc.), d’autant que la méthodologie carbone de la SOLIDEO partageait un grand nombre d’orientation avec le label (stationnement, etc.) dont certaines ont ensuite été reprises par la réglementation RE2020. Ainsi, les derniers résultats présentés par les opérateurs immobiliers dans les études menées en phase PRO s’appuient sur le référentiel BBCA Bâtiments neufs V3.1 du 26 mars 2021.

Sur le Village des Athlètes, les particularités des différents immeubles et les choix techniques propres à chacun des opérateurs pour respecter leur budget carbone ont conduit la SOLIDEO à différencier par bâtiment les engagements en matière de labellisation BBCA, en les envisageant davantage comme un jalon pour garantir l’atteinte de l’objectif carbone global à l’échelle du secteur que comme un objectif en tant que tel. Dans la plupart des cas, les niveaux BBCA suivants ont été retenus :

- pour les bâtiments de logement de moins de 28 mètres, obtention du label BBCA niveau standard ;
- pour les bâtiments en rénovation, obtention du niveau standard de BBCA Rénovation ;



Vue aérienne du Village des Athlètes

- pour les bâtiments tertiaires, les opérateurs ont été encouragés à viser la labellisation BBCA niveau standard sans obligation de labellisation.

D’autres labellisations ont également été prescrites sur certains ouvrages en accord avec les maîtres d’ouvrage pour couvrir les thématiques eau, déchets, adaptation au changement climatique, santé, confort, etc. Le label HQE équipement sportif a ainsi été exigé sur le Gymnase du Bourget ou l’Arena de la Porte de la Chapelle, le PRISME à Bobigny applique la démarche Bâtiment Durable Francilien et la Marina du Roucas Blanc à Marseille celui de Bâtiment Durable Méditerranéen.

D. LES OUVRAGES AU RENDEZ-VOUS DES OBJECTIFS BAS-CARBONE

Les ouvrages olympiques présentent dans l'ensemble des résultats conformes aux objectifs fixés, à la fois sur la phase de construction des ouvrages et sur leur phase d'exploitation.

1. Les résultats pour les produits de construction et équipements

Le tableau ci-dessous synthétise, pour chacune des typologies d'ouvrage, les résultats obtenus sur le périmètre des produits de construction et équipements en l'état des connaissances à date de septembre 2024. Ce périmètre n'intègre pas l'impact carbone des postes déconstruction, déblais/remblais et chantier.

Bilan carbone des produits de construction et équipements (PCE) des ouvrages

Typologies d'ouvrage	Bilan carbone de référence (tCO ₂ eq)	Bilan carbone du projet (tCO ₂ eq)	Gain projet/référence
Village Olympique et Paralympique	246 718	171 486	-30%
Ecoquartier Fluvial	54 723	45 655	-17%
Village des Médias	68 987	56 071	-19%
Equipements publics	46 730	30 226	-35%
Equipements sportifs	116 178	97 925	-16%
Piscines	72 533	63 812	-12%
Bâtiments	15 679	13 576	-13%
Infrastructures	60 953	42 865	-29%
Aménagements paysagers	5 194	3 656	-30%
TOTAL	687 695	525 272	-24%

N.B : Le périmètre « Village Olympique et Paralympique » comprend :

- les espaces publics et réseaux du Village Olympique et Paralympique hors espaces publics de l'île Saint-Denis ;
- les lots immobiliers des lots A, B, D et E y compris la résidence étudiante E4b.

Les efforts réalisés par les maîtres d'ouvrage et leurs entreprises ont ainsi permis d'éviter, pour la construction des ouvrages olympiques, 24% des émissions des gaz à effet de serre par rapport à des projets classiques sur lesquels les solutions bas-carbone n'auraient pas été recherchées. Cela a représenté un gain d'environ 162 000 tCO₂eq.

Le bilan carbone actualisé en septembre 2024 s'appuie sur des données en grande partie définitives. En effet, 35 ouvrages sur 70 disposent de données de bilan carbone finalisées et auditées. Cela représente 75% du bilan carbone validé en volume. Le reste des ouvrages a été réceptionné plus tardivement ou le seront en phase héritage et les bilans carbonés sont en cours d'audit, les valeurs de conception sont donc conservées dans ces cas.

Enfin d'après les premiers résultats définitifs, nous ne constatons que très peu d'écart entre les valeurs réception et les valeurs conception : on relève -1% pour le Village des Athlètes dont le bilan carbone est complet. Cela témoigne de la qualité des études de conception et du très bon suivi qui a été réalisé en phase chantier évitant tout dérapage lors des dernières modifications de projet.

2. Les résultats sur l'ensemble du cycle de vie

Les résultats sur l'ensemble du cycle de vie comprennent les impacts liés à la construction ainsi qu'aux consommations d'eau et d'énergie pendant 50 ans d'exploitation. Les résultats sont présentés à date de septembre 2024 :

Bilan carbone sur l'ensemble du cycle de vie

Typologies d'ouvrage	Bilan carbone de référence (tCO ₂ eq)	Bilan carbone du projet (tCO ₂ eq)	Gain projet/référence
Village Olympique et Paralympique	430 720	244 157	-43%
Ecoquartier Fluvial	96 542	68 051	-30%
Village des Médias	124 906	82 273	-34%
Equipements publics	72 956	42 016	-42%
Equipements sportifs	247 897	186 871	-25%
Piscines	393 295	258 658	-34%
Bâtiments	18 573	15 796	-15%
Infrastructures	66 273	45 559	-31%
Aménagements paysagers	8 139	6 319	-22%
TOTAL	1 459 300	949 700	-35%

Ces résultats, en particulier le Village des Athlètes à -43% et les équipements publics à -42% pour lesquels les scénarios de référence étaient les plus documentés, sont à mettre en regard de l'objectif général de réduction de 50% des émissions.

Il est à noter que le résultat de -43% sur le Village extrapole et prolonge sur 50 ans les performances bioclimatiques évaluées en phase Jeux, alors même que des travaux d'amélioration sur l'étanchéité à l'air des ouvrages auront lieu entre la phase jeux et la phase héritage et conduiront à une amélioration de ces résultats. Il faut également relever que ces résultats sont calculés avec les ratios énergétiques de la RT2012 et seraient sensiblement améliorés avec les ratios énergétiques aujourd'hui en vigueur, compte-tenu des choix énergétiques du Village, en particulier la géothermie dont l'énergie principale est l'électricité. Il est bien toujours compatible avec l'objectif de -47% évalué pour la phase héritage.

Le bilan carbone global de l'ensemble des ouvrages est présenté ci-après. Il détaille les émissions liées aux produits de construction et équipement (PCE – phase construction) et énergie (pour 50 ans d'exploitation).



Vue aérienne des chantiers sur les secteurs Quinconces et Belvédères en décembre 2022

Bilan carbone de l'ensemble des ouvrages

Ouvrages	Données	Bilan global (tCO ₂ eq)	dont PCE (tCO ₂ eq)	dont Energie (tCO ₂ eq)
VOP - Espaces publics	Réception	24 147	18 900	484
VOP - Quinconces (Secteur D)	Réception	52 996	36 048	12 824
VOP - Belvédères (Secteur E)	Réception	55 247	37 398	13 635
VOP - Universeine (Secteurs A&B)	Réception	107 627	76 719	24 186
VOP - Résidence étudiante E4b	Réception	4 141	2 421	1 428
Groupe scolaire de Saint-Ouen	Réception	4 002	3 301	665
Groupe scolaire de Saint-Denis	Conception	6 180	4 545	1 579
Gymnase Pablo Neruda	Conception	2 756	1 335	1 326
Grande Nef de l'Île des Vannes	Conception	9 170	5 997	2 930
Base de la Préfecture de Police	Conception	4 869	1 808	3 061
Lycée Marcel Cachin	Réception	14 885	11 659	2 840
Ecoquartier Fluvial - Espaces publics	Réception	8 552	6 587	871
Ecoquartier Fluvial - Lots PA à PE	Réception	59 499	39 068	19 074
Franchissement Ile-Saint-Denis	Conception	9 163	8 367	Non concerné
Enfouissement lignes haute tension	Réception	7 924	7 028	Non concerné
Dragage petit bras de la Seine	Conception	850	850	Non concerné
Mur anti bruit A86	Conception	921	835	Non concerné
Echangeurs A86-A1	Conception	10 351	10 351	Non concerné
CDM - Espaces publics	Conception	13 956	11 074	444
CDM - Aire des Vents (Secteur A)	Réception	31 060	20 895	7 660
CDM - Plateau (Secteur D)	Réception	37 257	24 102	9 845
Groupe scolaire de Dugny	Conception	3 926	2 925	914
Equipements sportifs Le Bourget	Réception	435	397	37
Gymnase du Bourget	Réception	2 583	1 880	588
Franchissement A1 Le Bourget	Réception	1 121	676	Non concerné
Terrain des Essences	Conception	900	156	Non concerné
Ecoles du Bourget	Réception	7 719	5 591	1 825
Hall 3	Réception	15 796	13 576	1 877
Piscine 6 routes de Marville	Réception	23 169	5 320	17 697
Cheminements Marville	Conception	1 621	1 276	NC
Cheminements Le Bourget	Conception	3 384	3 384	NC
Stade de France	Conception	3 810	3 810	Non disponible
Canal Saint Denis	Conception	6 038	6 038	Non concerné
CAO et franchissement A1	Réception	64 519	29 060	34 070
Couverture Suzanne Lenglen	Réception	3 526	3 293	233
Arena Porte de la Chapelle	Réception	34 015	28 014	5 268
Stade Pierre de Coubertin	Réception	21 697	1 061	20 618
Abords du Grand Palais	Conception	1 454	1 365	51
Grand Palais Nef	Conception	13 222	13 222	Non disponible

Gymnase Max Rousié	Réception	17 580	1 793	10 356
Gymnase des Poissonniers	Réception	5 801	1 423	4 245
Gymnase Bertrand Dauvin	Réception	20 221	3 680	16 184
Piscine Georges Vallerey	Réception	39 209	3 276	34 775
Voies olympiques Paris	Conception	148	121	2
Voies olympiques Etat	Conception	1 519	1 519	Non concerné
Voies olympiques Préfecture de Police	Conception	110	110	Non concerné
Marina du Roucas Blanc	Réception	7 778	5 903	1 490
Stade Yves du Manoir	Réception	24 847	20 900	3 247
Stade nautique de Vaires-sur-Marne	Conception	20 588	19 961	NC
Colline d'Elancourt	Réception	5 419	3 500	NC
Piscine Maurice Thorez	Réception	3 135	3 135	NC
Centre aquatique d'Aulnay-sous-Bois	Conception	42 346	13 183	27 996
Piscine d'Aubervilliers	Réception	22 418	6 738	14 565
Gymnase Guy Moquet	Conception	3 308	2 753	554
Piscine de Colombes	Conception	66 272	5 410	59 993
Complexe sportif Auguste Delaune	Conception	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Palais des sports de St Denis	Conception	13 300	2 823	10 264
Prisme	Conception	16 478	13 260	1 809
Héritage aquatique	Héritage	-	-	-

Les Jeux ont été l’occasion de mettre en lumière des savoir-faire et des performances carbone ambitieuses pour un panel important et varié de projets. Ils marquent une étape clé sur la trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les domaines de la construction et de l’aménagement.



Le Village des Athlètes aux couleurs des Jeux

3. L'atteinte des labellisations bas-carbone

Les résultats concernant les labellisations sont encore provisoires, d'une part car la démarche de labellisation peut prendre quelques mois après la réception, et d'autre part car des travaux ont encore lieu en phase héritage. Sur le Village des Athlètes notamment, les travaux de réversibilité auront lieu en 2025 et des actions correctives sont notamment prévues pour améliorer l'étanchéité à l'air (voir page 55).

Niveaux pressentis atteints sur le Village des Athlètes

	Résultats E+C-	Résultats BBCA
Secteur Quinconces	Sur les plots bas de logement : objectifs pressentis atteints - E3C2 (sauf 1 plot E2C2) Sur les plots hauts de logement : objectifs pressentis dépassés - E3C2 Sur les bureaux : objectifs pressentis atteints - E2C1	Sur les plots bas de logement : objectifs pressentis dépassés - niveau excellence
Secteur Belvédères	Sur les plots bas de logement : objectifs pressentis atteints (sauf 3 plots) - E3C2 Sur les plots hauts de logement : objectifs pressentis dépassés - E3C2 Sur les bureaux : objectifs pressentis atteints - E2C2	Sur la majorité des plots : objectifs pressentis dépassés - niveau performance ou excellence
Secteur Universeine	Sur les plots bas de logement : objectifs pressentis atteints - E3C2 Sur les plots hauts de logement : objectifs pressentis atteints - E3C1 Sur les bureaux : objectifs pressentis atteints - E2C2	Sur les plots bas de logement : objectifs pressentis atteints - niveau standard

Concernant les autres ouvrages :

- l'Arena Porte de la Chapelle, le stade Yves du Manoir et la Marina du Roucas Blanc à Marseille atteignent leur objectif E3C1 ;
- le Groupe scolaire de Saint-Ouen, atteint le niveau E3C2 et une labellisation BBCA excellence pour un niveau standard demandé.

Ces très bons résultats ont été obtenus grâce à l'application de l'ensemble des principes de construction bas carbone et circulaire décrits dans les parties suivantes :

- la frugalité de la construction, la modularité des espaces et la réversibilité d'usage (voir page 70) ;
- l'utilisation de matériaux bas-carbone en particulier le bois, les biosourcés et le béton-bas carbone (voir page 27) ;
- la mise en œuvre de matériaux circulaires, recyclés et de réemploi (voir page 81) ;
- la sobriété énergétique et l'utilisation de sources d'énergie bas-carbone (voir page 54).



E. LES MATÉRIAUX ET DES TECHNIQUES BAS-CARBONE

1. Le bois sur le podium des matériaux durables

Matière première renouvelable, biosourcée et disponible localement, le bois constitue un des principaux leviers de décarbonation du secteur bâtimentaire. Son usage en structure permet de diminuer la part de matériaux à forte empreinte carbone, et de séquestrer temporairement du carbone lors de la phase de vie du bâtiment.

De façon générale, dans une logique de sobriété, la SOLIDEO a cherché à utiliser le bon matériau au bon endroit et pour le bon usage, ce qui l'a conduit à prescrire et à recommander l'utilisation du bois pour une grande diversité de typologies d'ouvrages et de modes constructifs (logements, bureaux, ouvrages d'art, groupes scolaires etc.).

a. Un atout incontournable intégré dans les prescriptions de la SOLIDEO

Facilement transformé en une diversité de produits pour répondre aux besoins du bâtiment, qu'il s'agisse de bois d'ossature, de bois de fermette, de bois lamellé-collé ou de bois massif abouté, le bois peut être utilisé presque partout mais il est particulièrement pertinent pour les structures et les enveloppes où la substitution de matériaux plus carbonés est cruciale. Pour les enveloppes neuves ou rénovées, il est utilisé dans les ossatures structurelles du mur ossature bois (MOB) ou en façade ossature bois (FOB) avec une structure bois/métal. En isolation, le bois est utilisé pour l'isolation thermique par l'extérieur (ITE), l'isolation thermique répartie (ITR) et l'isolation thermique intérieure (ITI). Pour les parements et revêtements, le bois est utilisé tant pour les intérieurs (sols, murs, plafonds) que pour les extérieurs (bardages, brise-soleil orientables, platelages).

Le recours massif à la construction bois et aux matériaux biosourcés représentaient dès lors un levier incontournable pour satisfaire les objectifs carbone visés par la SOLIDEO. La SOLIDEO a travaillé de concert avec les différentes parties prenantes de la conception pour maximiser l'utilisation du bois. Les groupements ont été invités à privilégier le bois comme dispositif de construction y compris dans des situations où il se trouverait invisible (poteaux poutres encapsulés, façades à ossatures bois avec revêtements céramiques etc.). Aucune exigence de quantité n'a cependant été imposée afin de laisser les

Vue en coupe de la construction d'un bâtiment en structure bois sur le VOP



maîtrises d'ouvrages et les architectes libres de retenir le mode constructif désiré et approprié, tant que celui-ci permettait le respect du budget carbone alloué à chaque projet.

La SOLIDEO a défini des prescriptions qui viennent renforcer et garantir le caractère vertueux de l'utilisation du bois de construction :

- la certification PEFC ou FSC, garantes d'une gestion durable des forêts, pour l'ensemble des approvisionnements ;
- l'interdiction des bois d'origine exotique et boréale, hors contrainte technique majeure² ;
- la mise en œuvre d'un minimum de 30% de bois français.

Les documents contractuels établis (conventions d'objectifs, promesses de vente) ont tous adopté ce cadre, voire des dispositions plus contraignantes.

Une diversification des essences a également été privilégiée notamment pour favoriser le recours à différents feuillus dans les éléments non structurels. Les essences majoritairement utilisées sont l'épicéa, le pin, le hêtre et le douglas.

2- Cette prescription a été respectée sur l'ensemble des ouvrages. Sur le Village des Athlètes, aucune contrainte technique justifiant une dérogation n'a été identifiée sur les lots immobiliers. Sur les espaces publics, dans le cas particulier du platelage bois des berges de Seine et de la promenade Cesária Évora, une contrainte technique relative à la pérennité du dispositif dans le cadre de maintenance prévu a conduit à identifier des essences exotiques (Tali, Massaranduba, Padouk et Badi) comme solution alternative proposée aux entreprises dans le cadre de la consultation (voir page 29).

b. 15 ouvrages olympiques présentent du bois en structure

De nombreux ouvrages olympiques accordent une place importante au bois en structure, notamment pour les structures primaires (poteaux-poutres lamellées collées, panneaux de bois lamellé-croisé etc.). Le bois est ainsi utilisé sur des typologies variées de programmes et de bâtiments (logements, bureaux, groupes scolaires, hall d'exposition, centre aquatique...).

Il est généralement admis que la mise en œuvre de ces éléments de structure en bois ont présenté un surcoût par rapport à une structure béton traditionnelle, sans que cela ait remis en cause l'équilibre économique générale des projets. A titre d'exemple, un promoteur du Village des médias a évalué à 230€/m² le prix de revient des planchers bois CLT, contre 100 à 120€/m² pour des planchers en béton.



Cartographie des ouvrages olympiques faisant intervenir du bois en structure

Le Village des Athlètes, vitrine d'excellence pour la filière bois

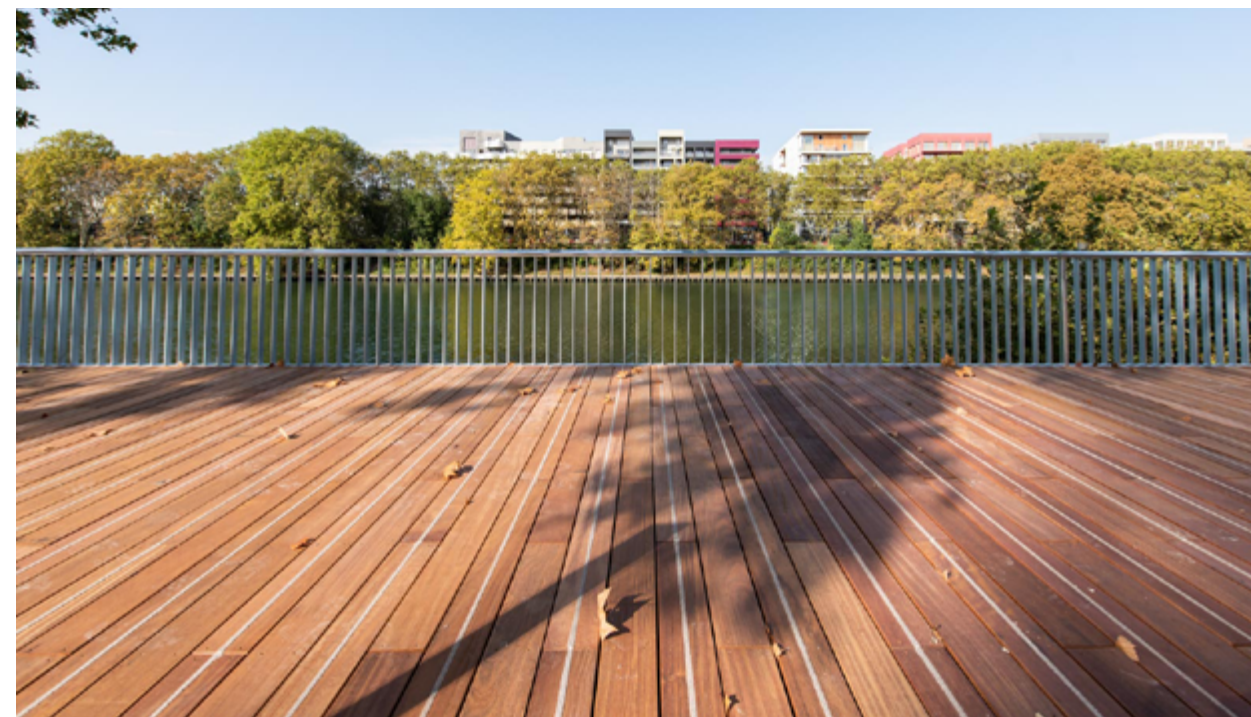
Les systèmes constructifs des bâtiments du Village des Athlètes offrent une place importante au bois à la fois en structure et en habillage.

Les plots résidentiels de moins de 28 mètres font tous intervenir du bois en structure (poteaux et poutres) avec des planchers bois pour la majorité d'entre eux (hors socle et noyau). 50 plots du Villages des Athlètes intègrent du bois pour au moins un élément (façades, planchers etc.) dont 30 d'entre eux présentent un système constructif intégral en bois (poteaux poutres, planchers et façades bois) soit 33% des 89 plots construits. Pour certains bâtiments ayant une configuration

tertiaire en héritage mais adoptant une configuration résidentielle pendant les Jeux pour accueillir des athlètes, la mise en œuvre de bois en structure complexifiait trop les travaux de réversibilité (en matière incendie et acoustique) et n'a donc pas été retenue (voir page 72).

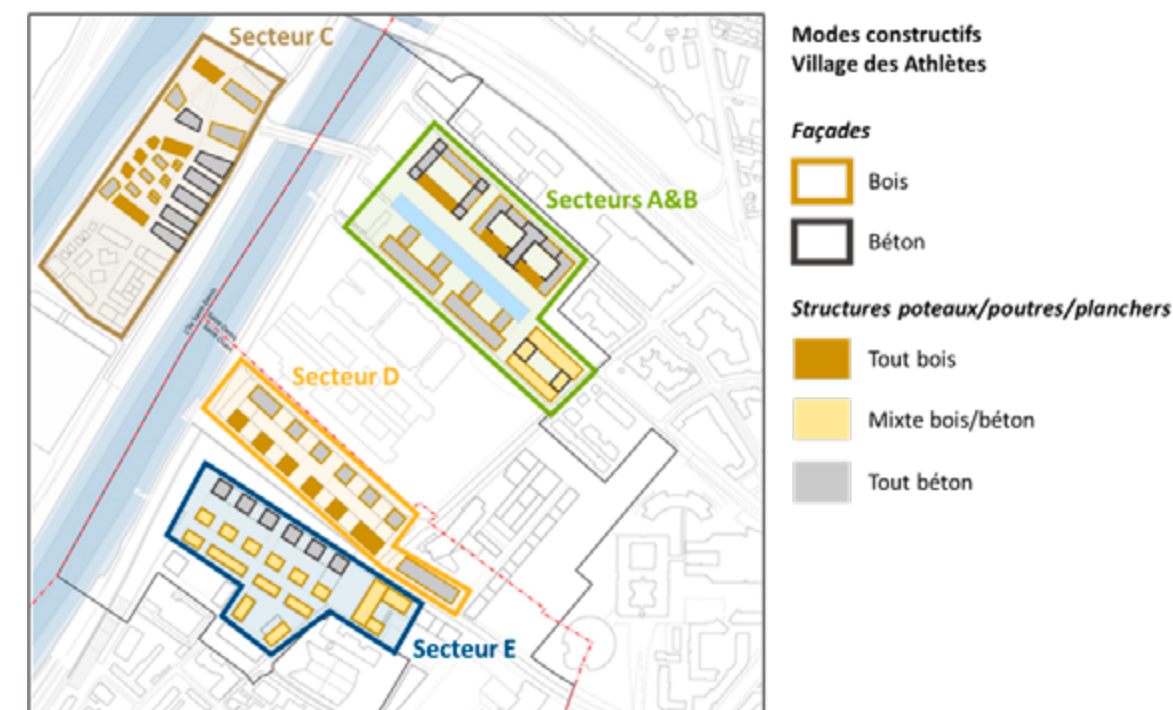
Au total, ce sont plus de 17 500 m³ de bois qui ont été mis en œuvre dont 80% sont du bois de structure (poteaux poutres, planchers, façades etc.). Sur près de 280 000 m² SDP que représente la partie continentale du Village des Athlètes :

- 200 000 m²SDP font intervenir du bois en façade
- 80 000 m²SDP avec du bois en structure (poteaux et/ou poutres et/ou planchers)



Platelage des berges de Seine du VOP

Le bois trouve aussi sa place dans l'aménagement des espaces publics de ce nouveau quartier. Les 15 hectares d'espaces publics offrent aux usagers des lieux publics agréables où se rencontrer et se détendre, à l'image des berges de Seine. Ils intègrent des platelages en bois notamment sur les berges de Seine et la promenade Cesária Évora. Également, les différents mobiliers (assises, tables, poubelles etc.) sont faits de mélèze français.



Représentation simplifiée de l'usage du bois dans les lots privés du Village des Athlètes

Le franchissement de l'A1 entre Dugny et Le Bourget

Le succès des matériaux industriels comme le béton et l'acier a éclipsé durant plusieurs décennies les matériaux naturels comme le bois pour la construction d'ouvrages d'art piétonniers et routiers. Sur les milliers de ponts routiers que compte la France, seule une dizaine est constituée d'une structure en bois.

La conception des ouvrages d'art demande une approche méthodique, et en particulier la recherche d'une combinaison équilibrée des systèmes primaire et secondaire à partir d'un choix large de constructions approuvées, mais aussi innovantes, parmi lesquelles les solutions bois.

Cependant, les défis liés à l'usage du bois sont multiples et peuvent amener une complexité supplémentaire car moins documentés et éprouvés que leurs égaux en structure béton ou métallique.

Pour le franchissement de l'A1 entre Dugny et Le Bourget, le groupement lauréat a proposé un tablier en structure primaire mixte bois béton : le béton pour les piles et le revêtement ainsi que le bois comme structure principale avec des poutres en lamellé-collé GL24h organisées en lames superposées. Ce sont 330 m³ de douglas français provenant du Morvan qui sont ici mis en œuvre dans la structure de l'infrastructure. Le platelage béton recouvert d'une étanchéité permet de protéger le bois des intempéries avec un dessin en débord formant une casquette. La section en bois est elle-même inclinée pour réduire son exposition à la pluie.

Imaginée dès le départ en bois et en béton à formulation bas carbone, la passerelle actuelle permet un gain carbone de près de 370 tCO₂eq en comparaison à une conception plus classique en structure mixte béton/acier

qui avait été étudiée en base comme référence lors de la phase faisabilité du projet.

Sur le sujet de la sensibilité au feu de la structure, pour répondre à la demande de garantir la stabilité au feu de 2h au-dessus de l'autoroute, le groupement a notamment dû travailler sur les tiges d'ancrage qui relient les 3 tronçons de la passerelle mesurant 100m de long. Ces pièces métalliques, soumises à d'importants efforts, sont ancrées dans le bois avec une résine particulière. Cette résine perdant ses propriétés mécaniques au-delà de 60°C, les pièces ont été habillées avec des plaques de plâtres pour calfeutrer les jonctions métal/bois et participer à la justification de la résistance au feu sans surdimensionner ces éléments. Une couche de bois supplémentaire a aussi été prévue pour protéger la partie structurelle, en s'autoprotégeant par sa combustion en périphérie, et conserver des sections à cœur suffisantes pour assurer la stabilité de l'ouvrage. Ce point est d'autant plus important compte-tenu du caractère massif des sections de l'ouvrage.

Cet ouvrage démontre que l'association du bois et du béton pour la structure principale est une piste privilégiée à explorer pour décarboner les ouvrages d'art. La conception proposée du tablier en bois lamellé collé, avait déjà été mise en œuvre sur d'autres ouvrages comme la passerelle achevée en 2017 à Neckartenzlingen, commune située dans la périphérie de Stuttgart. Elle est tout à fait reproductible et intéressante en termes de caractéristiques mécaniques et impact environnemental. Le Cerema a publié en 2019 un guide *Ponts mixtes bois/béton à poutres en lamellé-collé* et récemment un guide complémentaire *Eurocode 5 - Application aux ponts-routes à tablier mixte bois/béton en poutres lamellé-collé* permettant d'accompagner les concepteurs vers les bonnes dispositions constructives.

Les établissements scolaires du programme olympique

La programmation des trois groupes scolaires en construction, en cohérence avec la stratégie d'excellence environnementale de la SOLIDEO, suit les principes de la construction bas-carbone. Pour chacun d'entre eux, des objectifs carbone en phase construction ont été définis et ont incité les concepteurs à actionner deux leviers : l'économie de matière et le recours aux matériaux les moins carbonés possibles. Les groupes scolaires ont ainsi atteint des valeurs exemplaires de bilan carbone en phase construction, bien inférieures au seuil le plus exigeant de la réglementation carbone en phase d'expérimentation lors de leur conception.

Pour atteindre ces résultats, les systèmes de construction poteaux-poutres ont été privilégiés réduisant les quantités de matière mais c'est surtout l'utilisation massive de bois et de matériaux biosourcés qui y ont contribué. L'utilisation de bois en structure ou en façade est également complétée par



la mise en œuvre de menuiseries intérieures ou extérieures bois, d'isolants biosourcés et parfois de revêtements de sol type linoléum. Les établissements scolaires présentent donc un fort taux d'incorporation de matériaux biosourcés qui peut être mis en perspective avec les niveaux du label biosourcé.

Résultats de bilan carbone des groupes scolaires	Bilan carbone PCE		
	Ecoles du Bourget	Groupe scolaire de Saint-Ouen	Groupe scolaire de Dugny
Source	Document de réception	Document de réception	Document d'étude
Résultat PCE en kgCO ₂ eq/m ² SDP	693	668	717
Ecart au niveau C1 1 050 kgCO ₂ eq/m ² SDP	- 34%	- 36%	- 32%
Ecart au niveau C2 750 kgCO ₂ eq/m ² SDP	- 8%	- 11%	-4%

Modes constructifs bois des groupes scolaires

École du Bourget

863 tonnes de bois en structure

- Système poteaux poutre en bois, mur à ossature bois, plancher en CLT
- Isolation en panneau de fibre de bois et coton médisse
- Menuiseries extérieures bois alu
- Bardage cour intérieure en mélèze

Groupe scolaire de Saint-Ouen

157 tonnes de bois en structure

- Socle en béton au RdC
- Système poteaux poutre en bois en R+1 et R+2, mur à ossature bois
- Isolant en fibre de bois
- Bardage en mélèze

Groupe scolaire de Dugny

96 tonnes de bois en structure

- Socle en béton bas-carbone au RdC
- Système poteaux poutre en bois en R+1
- Isolant en laine de bois



Le franchissement de l'A1 reliant le Bourget à Dugny

Les gymnases annexes de l’Arena Porte de la Chapelle

Le complexe sportif de l’Arena Porte de la Chapelle fait intervenir du bois structurel pour un peu plus de 270 tonnes. Annexés à la grande salle principale, les deux gymnases superposés sont soutenus par une charpente en épicéa finlandais et des planchers mixtes bois/béton. Un bardage en douglas reposant sur des chevrons en sapins sont également présents en façade. Les assises du gymnase 2 ainsi que la structure du tipi présent en toiture sont eux en épicéa et en douglas français.

La charpente bois des gymnases annexes de l’Arena Porte de la Chapelle



Récapitulatif des volumes bois dans les constructions olympiques

Opération	Volume de bois total (m³)	Usages
Groupe scolaire de Dugny	400	Charpente
Ecoles du Bourget	1 726	Façades, toitures, planchers et cages d’ascenseurs
Franchissement A1 du Bourget	330	Structure du tablier
Gymnase du Bourget	200	Charpente
Hall 3 du Parc des Expositions	1 856	Charpente et parements intérieurs
Piscine de Marville	444	Charpente, bardage et brise-soleils
Stade Yves du Manoir	1 653	Poteaux poutres, planchers, façades
Arena Porte de la Chapelle	568	Charpente, poutres, planchers, bardage
Centre Aquatique Olympique	2 910	Charpente et façades
Ecoquartier Fluvial	3 568	Poteaux poutres et façades
Groupe scolaire Saint-Ouen	327	Charpente, bardage et planchers
Lycée Marcel Cachin	221	Charpente et poteaux poutres
Quinconces	4 103	Poteaux poutres, planchers, façades
Belvédères	4 345	Poteaux poutres, façades
Universeine	5 749	Poteaux poutres, planchers, façades
Total	28 410	

Le stade Yves du Manoir

Le stade Yves du Manoir est un lieu historique de ces Olympiades car il est le seul à avoir précédemment accueilli les Jeux lors de l’édition de 1924. A l’occasion de la rénovation du site, deux nouveaux bâtiments ont été construits pour en augmenter la capacité d’accueil et l’un d’eux abritera désormais le siège de la Fédération Française de Hockey. La conception de ces deux bâtiments a fait la part belle au bois en le faisant intervenir aussi bien en structure avec des configurations de poteaux poutres planchers, qu’en façade à ossature bois et en second œuvre avec du parquet, des plinthes ou encore des brise-soleils. Plus de 1 030 tonnes sont ainsi comptabilisées dont plus de la moitié sont garanties d’origine France.

La réussite de l’intégration du matériau bois dans une diversité d’ouvrages olympiques et de produits de construction

La grande majorité des ouvrages olympiques avec du bois en structure fait intervenir, pour des raisons de programmation, des éléments en béton en infrastructure ce qui conduit à des chantiers mixtes bois/béton. En s’affranchissant des contraintes liées à l’infrastructure, par exemple pour le stationnement, une évolution vers des chantiers tout bois pourrait être

c. Savoir s’entourer pour expérimenter et lever les freins techniques et réglementaires

La filière bois présente au rendez-vous

La forte demande en bois générée par les ouvrages olympiques et paralympiques a encouragé la structuration de la filière Bois, déjà engagée depuis 2013 par le Comité Stratégique de Filière Bois. Parmi les 3 projets structurants de son Contrat Stratégique 2018/2022, l’ambition de « Réaliser de manière exemplaire les ouvrages olympiques et paralympiques des JOP Paris 2024 avec les solutions constructives bois et d’aménagements en bois » est clairement affirmée. Dès l’été 2018, cette ambition conduit à la création de France Bois 2024, qui a été un partenaire de premier plan de la SOLIDEO, et dont les missions étaient :

- le développement de préconisations techniques auprès de la SOLIDEO et des donneurs d’ordre publics et privés ;
- l’accompagnement et la communication auprès des entreprises de la filière ;
- la formation sur le chantier à destination des conducteurs de travaux.

FRANCE BOIS 2024 La SOLIDEO a donc travaillé en étroite collaboration avec France Bois 2024 sur l’ensemble de ces sujets, afin de permettre, dans une logique d’héritage, la montée en puissance de la filière bois française. Les Jeux ont été l’occasion pour tous les maillons de la filière bois française de démontrer ses capacités, ses compétences et ses atouts auprès des donneurs d’ordre.

FIBOIS La SOLIDEO a également établi un partenariat étroit avec FIBOIS Île-de-France. Signataire du Pacte Bois-Biosourcés, elle a atteint le niveau « Or » de ce Pacte pour l’opération du Village des Athlètes.

envisagée, avec des gains en termes de cadences et modalités de gestion.

Outre les aspects techniques, les réalisations olympiques ont contribué à véhiculer le développement de la culture du bois dans la construction, à la fois pour les acteurs de la filière habitués à ce matériau qui ont appris à s’organiser rapidement pour répondre aux enjeux des grands projets mais aussi pour les professionnels du bâtiment qui ont développé de nouvelles compétences en la matière.

D’autres parties prenantes de la construction des ouvrages olympiques sont signataires de ce pacte : la Région Île-de- France, la Métropole du Grand Paris, la Ville de Paris, Plaine Commune, Icade, Nexity, Sogeprom et Demathieu Bard Immobilier.

Un partenariat étroit avec la sphère technique

La SOLIDEO a été accompagnée par l’Agence qualité construction (AQC) sur les sujets de maîtrise des risques, notamment en matière de modes constructifs. L’AQC a accompagné la SOLIDEO dans le traitement des questions relatives à la mise en œuvre de façades à ossature bois, la validation des guides de conception par la commission prévention produits qui regroupe les assureurs et les contrôleurs et permet le passage d’innovations en techniques courantes, et le suivi des risques identifiés, comme le risque d’humidité en phase chantier dans les façades. L’AQC a accompagné également l’analyse des projets présentés au Comité d’innovation de la SOLIDEO en vue d’un financement par le Fonds Innovation et Écologie. Elle apporte une expertise technique et économique sur les projets présentés, les freins à lever, les risques associés en matière de faisabilité technique mais aussi assurantielle.

Dans le cadre du développement des guides de conception, la SOLIDEO a travaillé également en partenariat avec le CSTB, en particulier par l’intermédiaire de marchés de coopération entre pouvoirs adjudicateurs. Ce partenariat a permis l’élaboration par le CSTB de deux guides de conception pour les façades ossatures bois et d’un guide pour la réalisation de douches zéro ressaut sur plancher bois qui, au même titre que les guides incendie publiés par France Bois 2024, resteront des piliers de l’héritage méthodologique de la SOLIDEO concernant la construction bois.

Entre design architectural et innovation constructive, les façades à ossature bois se démarquent et préparent leur entrée en technique courante

Les façades ossature bois non porteuses (FOB) rapportées sur des structures béton, métal ou bois sont des solutions techniques de plus en plus fréquemment utilisées pour répondre aux exigences de la nouvelle réglementation RE2020. Le principe de la mixité constructive alliant le béton et le bois pour la structure et le bois pour l'enveloppe permet de tirer le meilleur parti de ces deux matériaux : la robustesse du béton pour la stabilité de l'ouvrage et la légèreté du bois pour la diminution des fondations ou encore l'inertie thermique du noyau béton pour le confort d'été et les performances thermiques du bois pour le confort d'hiver. De nombreux autres arguments favorisent également le développement de ce type de solutions techniques comme le gain de surface habitable par l'amincissement de l'enveloppe extérieure ou la diminution des temps de chantier avec l'avantage de la préfabrication des façades en ateliers. Couverte par le NF DTU 31.4, cette

technique constructive est limitée aux ouvrages dont la hauteur du plancher bas du dernier niveau est inférieure ou égale à 28 mètres.

La SOLIDEO a souhaité conforter son retour d'expérience concernant les façades à ossature bois en effectuant une analyse comparée du bilan carbone de 4 types de complexes de façades :

- voiles en béton armé avec isolation par l'intérieur ;
- poteaux-poutres en béton armé avec remplissage parpaings et isolation par l'extérieur ;
- poteaux-poutres en béton armé avec remplissage FOB ;
- poteaux-poutres en bois avec remplissage FOB : complexe utilisé sur un secteur du village. Dans cette étude, on compare le bilan carbone des façades à partir des éléments composant la façade (partie vitrée, partie opaque et structure en façade), les autres paramètres (taux d'ouverture, menuiserie, occultation) sont constants.

Comparatif carbone de différents types de façade

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4 du Village des Athlètes
Structure	Voile béton	poteaux poutres béton	poteaux poutres béton	poteaux poutres bois
Remplissage	/	Parpaing	FOB	FOB
Isolation	ITI laine minérale	ITR laine minérale	ITR laine de bois	ITR laine de bois
Bilan carbone de la façade (partie opaque, partie vitrée, structure en façade) kgCO ₂ eq/ m² façade	104	85	78	69
Gain de la solution poteaux poutres bois et FOB	-34%	-19%	-11%	-

La solution privilégiée sur le Village en structure bois avec une façade ossature bois et un isolant biosourcé en laine de bois permet un gain important sur l'impact carbone par rapport aux autres solutions considérées : 34% par rapport aux voiles béton armé et isolation intérieure en laine de verre et environ 20% par rapport à une structure poteaux-poutres béton avec remplissage en parpaings et isolation extérieure en laine de verre.

Cette solution bas-carbone est centrale dans la construction du Village car le complexe de façade représente jusqu'à 45% du bilan carbone des produits de construction, comme dans ce cas d'étude. Le choix des volets qui représente 8% de ce lot façade et des menuiseries à 6% est également important.



La SOLIDEO a permis le passage en technique courante de plusieurs procédés de façades à ossatures bois.

Compte tenu de l'état actuel des techniques de construction, et afin d'offrir aux concepteurs du Village des Athlètes une grande richesse architecturale tout en assurant la généralisation du recours au bois en façade, y compris pour les immeubles de moyenne et grande hauteur – respectivement de plus de 28 mètres et de plus de 50 mètres – la SOLIDEO et les opérateurs immobiliers se sont engagés dans une démarche d'obtention d'Appréciations techniques d'expérimentation (ATEX³).

La SOLIDEO a ainsi engagé en 2020, avec la participation des opérateurs immobiliers du Village, une démarche de coopération avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Cette démarche a abouti en novembre 2020 à la publication de guides qui ont accompagné les équipes opérationnelles dans la mise au point des dossiers d'ATEX en vue de leur obtention.

Co-financée par le CSTB, la filière, les opérateurs et le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO pour un montant total de 450 000 €, cette initiative s'inscrit dans la logique d'Héritage pour l'ensemble des acteurs de la construction bois. Elle favorise aussi la généralisation du recours au bois en façade avec une diversité architecturale indispensable à la réussite d'un projet de quartier de l'ampleur du Village des Athlètes.

La démarche menée a permis l'obtention d'ATEX de cas B (valables pour une seule opération), les délais de dépôt des dossiers ne permettant pas la réalisation de dossiers de cas A. S'agissant d'ATEX de cas B, les demandeurs en sont les seuls propriétaires. Néanmoins, des clauses de réciprocité et de partages ont été intégrées pour esquisser une forme de jurisprudence commune qui avait été voulue dès le départ par l'écosystème des décideurs.

Au total, ce sont 15 ATEX relatives aux enveloppes des bâtiments du Village des Ath-

lètes qui ont ainsi pu être produites grâce à l'intelligence collective de toutes les parties prenantes (SOLIDEO, ADIVbois, France Bois 2024, CSTB, AQC, FCBA, Socotec, BTP Consultants). Grâce à ces guides, trois promoteurs (Eiffage-Nexity, VINCI et Icade), et cinq entreprises générales, ont porté la quinzaine d'ATEX, visant, pour la plupart, plusieurs bâtiments (jusqu'à 12 pour une seule ATEX), mais aussi plusieurs techniques non traditionnelles (jusqu'à quatre pour une seule ATEX). Les premiers procédés innovants d'isolation thermique par l'extérieur sur façade ou construction à ossature bois ont été mis en œuvre début 2022.

Dans le cadre d'un nouveau marché de coopération, la SOLIDEO souhaite coopérer à nouveau avec le CSTB afin de mettre à jour les deux guides réalisés et d'y intégrer les acquis et les retours d'expérience issus de la réalisation du Village des Athlètes. Il s'agira en particulier de s'appuyer sur l'ensemble des dossiers technique d'ATEX remis par les équipes de maîtrise d'ouvrage et les entreprises du Village des Athlètes afin d'en extraire les bonnes pratiques et des exemples de conceptions robustes apparues au Comité d'expert des ATEX, en particulier :

- la gestion des compatibilités de déformation entre les revêtements de façades et le mouvement des FOB, afin de les intégrer aux guides pour en renforcer le caractère opérationnel, pragmatique et didactique ;
- l'intégration de la gestion des descentes d'eaux pluviales aux guides existants ;
- l'élargissement de la portée de ces guides en introduisant un 3ieme type de système de revêtement de façade largement déployé sur le Village des Athlètes à base de bardage métallique.

La publication des guides révisées est prévue pour fin 2024.

Le Village des Athlètes préfigure la généralisation de douches accessibles sur plancher bois

A la croisée des ambitions d'accessibilité universelle et d'excellence environnementales portées toutes deux par la SOLIDEO, des nombreux échanges techniques ont été nécessaires pour parvenir à la réalisation de douches sans ressaut sur un plancher bois.

Au sens de l'article R. 162-4 du Code de la construction et de l'habitation et tel que décrit dans l'article 15 de la loi ELAN, tout logement situé en rez-de-chaussée ou en étage desservi par un ascenseur doit comporter au moins une salle d'eau, située au niveau d'accès du logement, équipée d'une zone de douche accessible, c'est-à-dire dont l'accès se fait sans ressaut ou d'une baignoire. L'absence de ressaut de douche est l'une des mesures garantissant une facilité d'accès et d'utilisation à tout usager tout en permettant une modularité de la pièce par désencombrement de l'espace.

Du fait que la surface de la pièce soit en continuité avec celle de la zone de douche, l'installation d'une douche sans ressaut s'avère plus complexe que celle d'une douche

traditionnellement surélevée. L'encastrement d'un dispositif d'évacuation d'eau directement dans le plancher induit des nombreuses contraintes de conception, en particulier pour le gros œuvre (surépaisseur au droit du plancher, réservations localisées pour le corps de l'évacuation et la canalisation d'évacuation, etc.) mais aussi sur le second œuvre (mise en œuvre d'une chape spécifique ou d'une forme de pente, importance de l'étanchéité pour prévenir toute infiltration d'eau directement dans la structure, surcouche éventuelle d'une isolation phonique, etc.). Bien que ces exigences techniques soient similaires qu'il s'agisse d'un plancher béton ou bois, la nature plus sensible à l'eau du support bois accentue d'autant plus les attentes quant à l'évaluation d'une absence de risque de pénétration d'eau dans le support et la détectabilité d'une éventuelle fuite. Par rapport à des solutions sur supports béton, les solutions sur planchers bois envisagées doivent démontrer une robustesse supplémentaire justifiée par une évaluation de type ATEx. Or, en l'état des pratiques constructives à date du dépôt de permis de construire, la réalisation d'une douche à très faible ressaut ou nul sur un plancher en bois constituait une technique non-traditionnelle. Cette solution ne disposait pas de retour d'expérience éprouvé.



Généralisation d'une douche sans ressaut sur support bois

Engagée dans une démarche d'innovation qui bénéficie aujourd'hui à l'ensemble de la filière, la SOLIDEO a démontré que la réalisation d'une douche sans ressaut sur support bois est une solution technique réalisable et répliquable.

Afin d'anticiper l'exigence réglementaire d'équiper les zones de douche accessibles d'accès sans ressaut, l'innovation a consisté en la réalisation et l'évaluation via une procédure d'ATEx de cas b), de douches sans ressaut sur plancher bois, avec finitions en sols carrelés.

L'innovation ici financée a donc eu deux volets :

Le premier volet a consisté en l'accompagnement de la réalisation et de l'évaluation via une procédure d'ATEx de cas b), de douches sans ressaut sur plancher bois, avec finitions en sols carrelés, sur 6 bâtiments du secteur D correspondant au total à 94 salles de bain / d'eau traitées (soit 679 m²). Ce premier accompagnement a été déterminant pour structurer un socle de bonnes pratiques dans une dynamique de recherche applicative amorçant ainsi le deuxième le deuxième volet d'essaimage.

Ce choix a permis de réduire l'impact carbone de 60 % par rapport à un plancher béton.

Le deuxième volet a consisté à accompagner la création d'un guide produit par le CSTB co-piloté par INGENECO Technologies et associant de nombreux partenaires, à l'instar de ce qui a été produit sur les procédés de façade sur supports bois, permettant ainsi de favoriser le développement sécurisé de l'offre industrielle sur ce type de support. Cette action, co-financée par le CSTB, la filière et le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO pour un montant total de 87 500€, s'est matérialisée par la publication d'un guide pour la mise en œuvre de douches accessibles « zéro ressaut » dans les salles d'eau à usage individuel en travaux neufs sur supports bois.

Les verrous levés lors du portage de l'innovation ont été les traitements des points faibles acoustiques, sécurité incendie, infiltrations d'eau liquide, risques de condensation en cas de vacances prolongée et de non nécessité de ventilation des pléniums ni de mise en place de pare-vapeur.

La charpente en bois du Centre Aquatique Olympique : une innovation de rang mondial en matière de construction bois



La charpente en bois du Centre Aquatique Olympique

La charpente du Centre Aquatique Olympique, portée en maîtrise d'ouvrage par la Métropole du Grand Paris, bénéficie d'une dotation de 7,1 millions d'euros HT du Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO.

Cette charpente est constituée de 91 poutres catènes en morceaux de 30 m avec au total 90m de portée et 10m à 15m de hauteur libre, ce qui en fait la plus grande structure en catènes du monde et la seule entièrement conçue en bois.

Sa géométrie concave s'adapte aux différents usages et permet de réduire le volume intérieur chauffé et ventilé de 30% par rapport à une géométrie horizontale, pour une plus grande sobriété.

La toiture accueille par ailleurs l'une des plus vastes centrales photovoltaïques de France sur bâtiment sportif en autoconsommation : 4 680 m² de panneaux, soit une production annuelle prévue de 616 165 kWh permettant de couvrir 19% des besoins électriques du CAO. Cette innovation fait la démonstration de la résistance du bois en tension sous charges permanentes. Elle illustre l'adéquation entre

construction bois et réalisations architecturales exceptionnelles et emblématiques. Aucun référentiel issu des Règles de l'art ne permettait de construire un tel complexe de toiture, ce qui a nécessité d'importantes études de conception (dimensionnement, mode de réalisation, transport, levage...). Une Appréciation Technique Expérimentale (ATEx de cas b, c'est-à-dire spécifique à l'opération) a été privilégiée pour fédérer, de façon organisée, toutes les investigations nécessaires et a permis sa reconnaissance en technique courante et son assurabilité.

La réalisation du complexe de toiture a nécessité l'intervention de 3 entreprises spécialisées, sous le pilotage de l'entreprise générale Bouygues Bâtiment Ile de France :

- Mathis constructeur bois en charge notamment de la fabrication et de pose des catènes et des voliges,
- BECI étancheur en charge du complexe intégrant l'isolation et de l'étanchéité,
- EDF/ENR en charge de la pose des panneaux photovoltaïque.



La charpente du Centre Aquatique Olympique

La dalle bois / béton : une alternative complémentaire aux planchers en bois massif



Réalisation d'une dalle bois/béton

Mise en œuvre par la SAS Paysages sur le Village des Médias pour un montant de 256 064€HT, l'innovation a consisté en la réalisation de planchers intermédiaires préfabriqués « bois/béton ». Basé sur une prédalle en béton préfabriquée, ce plancher intègre de façon manufacturée, des pains de fibre de bois qui viennent se substituer à hauteur de 40 % au béton.

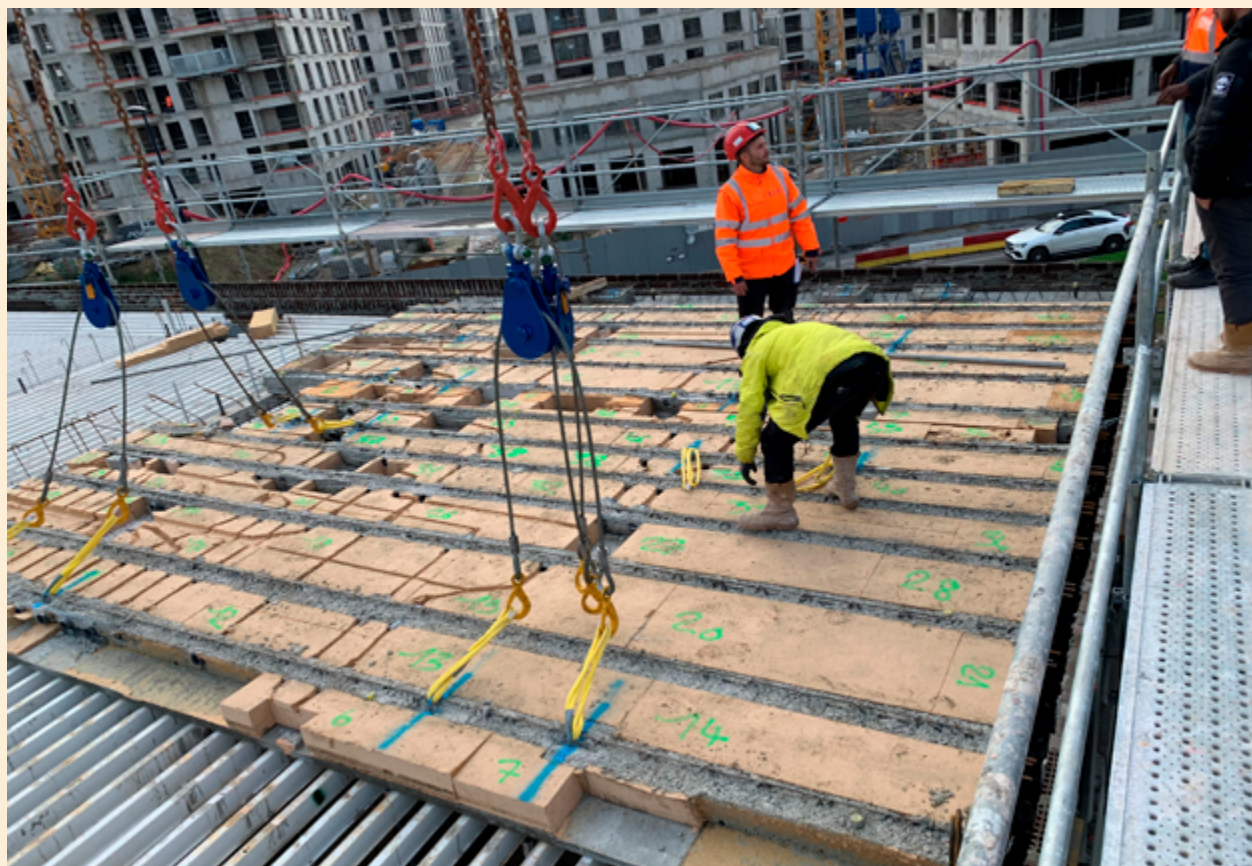
Le procédé dalle Bois Béton était déjà visé par une ATEx de cas a) au moment de la demande de subvention mais dont le domaine d'emploi ne couvrait pas l'incorporation de réseaux au plancher. Depuis le procédé est visé par le Document Technique d'Application 3.1/22-1066_V2 couvrant cet emploi.

L'intérêt de l'adoption d'une telle substitution

est multiple : on remplace une dalle béton, c'est à dire un matériau lourd (2500 kg/m³) et carboné par un matériau léger (130 kg/m³) et assimilable à un puits de carbone. Mise en œuvre sur le bâtiment A3.3 du Village des Médias, avec au total 2 146 m² de planchers sur 84 logements, l'innovation a permis de répondre à l'objectif d'obtention du niveau C2 du label E+C- sur le bâtiment A3.3.

La dalle permet ainsi :

- une réduction de CO₂ d'environ -40% par rapport à une dalle de béton standard de 20 cm en béton armé CEM II ;
- l'intégration d'un matériau biosourcé à hauteur de 12 kg/m².



Mise en œuvre de la dalle Bois Béton

La SOLIDEO a permis l'anticipation des évolutions réglementaires en matière de protection incendie en vue d'une massification de la construction bois de moyenne et grande hauteur

En France, la réglementation incendie est fondée sur une description des moyens mis en œuvre : la conception, les matériaux et produits de construction utilisés, la réduction des risques de départ d'incendie, l'évacuation des occupants et l'intervention des services de secours. La réglementation en matière de sécurité incendie applicable aux permis de construire déposés par les maîtres d'ouvrages du Village des Athlètes a été conçue principalement pour des bâtiments dont les éléments de structure sont principalement incombustibles (pierre et béton notamment).

Les constructions en bois de moyenne et de grande hauteur sont considérées systématiquement comme des constructions innovantes : il existait peu de retour d'expérience et chaque cas était traité séparément en adaptant la réglementation incendie, ce qui complexifiait la réalisation de projets bois conséquents et créait des incertitudes défavorables aux investisseurs. Compte tenu de l'ampleur des chantiers olympiques, en particulier de l'opération du Village des Athlètes, associée à une massification à venir de la construction bois de moyenne et grande hauteur, il a été nécessaire d'anticiper des évolutions réglementaires qui viendraient encadrer ces constructions. Afin de répondre à cet impératif de clarification normative dans un calendrier compatible avec la conception des bâtiments et le dépôt des permis de construire du Village des Athlètes, la SOLIDEO a engagé dès 2018 un processus de concertation entre l'Etat, la filière et les organismes compétents, notamment les pompiers. La réglementation a fait l'objet d'études complémentaires afin de préciser certains points inhérents pour des constructions en structures combustibles (bois et autres matériaux biosourcés notamment).

En l'absence de cadre réglementaire adapté, ces travaux ont finalement conduit à la publication début 2020 par France Bois 2024 et ADIVbois de *Notes de préconisations pour la sécurité en cas d'incendie pour les immeubles bois prévus dans le cadre des prochains JOP de Paris en 2024*, pour plusieurs typologies de bâtiments :

- note de préconisation pour la sécurité incendie des bâtiments d'habitation de 8 à 28 mètres ;
- note de préconisation pour la sécurité incendie des ERT - Bureaux de 8 à 28 mètres ;
- note de préconisation pour la sécurité incendie des ERP de 8 à 28 mètres ;
- note de préconisation pour la sécurité incendie des BBGH supérieure à 28 mètres.

Y sont explicités les dispositions à prendre en compte pour les immeubles de moyenne et grande hauteur utilisant massivement du bois pour répondre aux exigences en matière de sécurité incendie, à savoir, en fonction de la hauteur du bâtiment et de son usage :

- dispositions passives : ferme-portes afin d'assurer la fermeture systématique des portes et préserver ainsi leur capacité de résister au feu, doublage systématique des structures en bois par du plâtre ;
- moyens de défense incendie actifs : très forte incitation à l'usage de systèmes d'extinction automatique à eau (sans obligation) impliquant un impact fort sur la gestion des copropriétés et une augmentation des risques eau/bois ;
- mesures de gestion : visites périodiques de type immeuble de grande hauteur (tours de bureaux) mais dans un cadre de logement privé, plus complexe vis-à-vis des occupants.

Quand bien même les préconisations qu'ils retenaient pour les bâtiments supérieurs à 28 mètres se sont avérées trop contraignantes pour la réalisation de bâtiment en structure bois à ces hauteurs, ces documents, en apportant une réponse systématique aux enjeux incendie soulevés lors des dépôts des PC du Village des Athlètes, ont permis la massification des modes constructifs intégrant du bois pour les bâtiments du Village des Athlètes à un niveau jamais atteint en France auparavant. Ils ont en effet été retenus, en mars 2020, par les différentes parties prenantes pour servir de document d'appui à la rédaction des avis de la Brigade des Sapeur-Pompiers de Paris.

En complément, deux autres documents ont été édités :

- ADIVbois - Guide pour le traitement des point singuliers et des interfaces entre éléments de construction dans les bâtiments bois vis-à-vis du risque incendie ;
- CSTB - Bois construction et propagation du feu par les façades.

En juillet 2021, la préfecture de Police a publié une nouvelle doctrine intitulée *Doctrine pour la construction des immeubles en matériaux biosourcés et combustibles* qui avance une série de préconisations sur certains points

plus exigeantes pour les constructions bois de toutes hauteurs, en particulier en ce qui concerne les protections passives des parois. Elle ne s'est donc pas appliquée aux ouvrages du Village.

d. De hautes exigences sur la provenance et la traçabilité du bois

La certification des produits bois comme outil pour garantir une exploitation contrôlée et raisonnée de la ressource forestière

Les certifications forestières permettent d'assurer aux consommateurs que le matériau bois ou les produits à base de bois qu'ils achètent, proviennent d'une forêt qui est aménagée et exploitée de façon durable et responsable.

Lors de la rédaction de la stratégie d'excellence environnementale, la SOLIDEO a imposé le recours à des produits bois labellisés FSC ou PEFC, sans préférence entre les deux labels, qui certifient la mise en place de mesures pour la protection de la biodiversité et pour une gestion raisonnée de l'exploitation des forêts. Le choix d'un label internationalement reconnu pour la traçabilité du bois a ainsi contribué à l'atteinte des fortes ambitions environnementales et sociales de la SOLIDEO pour livrer un héritage durable et exemplaire dans le cadre des Jeux de Paris 2024.

Cette prescription s'appliquait aux produits. Pour les espaces publics du Village des Athlètes, la SOLIDEO a commandé une démarche volontaire supplémentaire auprès de FSC France et du FCBA. La SOLIDEO s'est engagée dans une démarche de certification de projet avec la mention FSC 100% pour les revêtements en bois tropical des berges de Seine et

de la promenade Cesária Évora. Dans le cas général, la SOLIDEO avait proscrit l'utilisation de bois tropical ou boréal pour tous les ouvrages, avec toutefois la possibilité de dérogations sous réserve de justifications techniques probantes démontrant que des contraintes techniques rendaient non pertinentes le recours au bois européen. Dans le cas particulier du platelage bois des berges de Seine et de la promenade Cesária Évora, l'enjeu de pérennité du dispositif dans le cadre de maintenance prévu (problématiques de crues liées à la présence de la Seine à quelques mètres en contrebas de l'ouvrage) a conduit la SOLIDEO à autoriser le recours à des essences exotiques (Tali, Massaranduba, Padouk et Badi) comme solution alternative proposée aux entreprises dans le cadre de la consultation. Une seule essence de bois local, le robinier (*Robinia pseudoacacia*), pouvait potentiellement répondre aux caractéristiques techniques requises, notamment un platelage de classe 4 non traité. Or les retours d'expérience disponibles à l'époque et les tendances des stocks disponibles de cette essence ne permettaient pas de garantir un approvisionnement sécurisé dans les coûts et les délais de l'opération.

Obtenue le 19 juin 2024 (FSC-P002069), cette certification de projet FSC a permis à la SOLIDEO de contrôler l'ensemble des maillons de la chaîne d'acteurs, depuis la forêt jusqu'aux entreprises de travaux.

Les approvisionnements français largement plébiscités

En plus de la prescription sur la certification des produits bois mis en œuvre, la question de l'origine de l'approvisionnement de ces produits a été considérée pour favoriser le développement d'une filière nationale. Cette prescription est à la croisée des ambitions environnementales (réduction de l'impact carbone du module transport en choisissant des lieux de transformation plus près du chantier) et des ambitions sociales (soutien au développement de l'économie locale car la filière bois est un viviers d'emplois en France et en Europe).

L'origine du bois revêt un intérêt au regard des caractéristiques techniques. Les arbres poussant dans des régions froides, comme la Scandinavie, ont une croissance lente ce qui confère aux produits bois résultants une très haute qualité mécanique (coefficient de rejet plus faible). Certains usages spécifiques, notamment pour les toitures, nécessitent des classements de bois exigeants. Ils sont le plus souvent incompatibles avec les classes de bois proposées par les bois français. De fait, il s'avère pertinent de varier les origines géographiques recherchées selon les usages et de réfléchir au dimensionnement de l'objectif

d'approvisionnement de bois français à l'échelle de toutes les spécificités des produits bois mis en œuvre. Pour exemple, le bois constituant la charpente du CAO provient de Finlande et de Suède tandis que celui utilisé en bardage est issu de forêts françaises, soit un ratio volumique de 2/3 et 1/3.

En 2018, en parallèle de la rédaction du cahier des charges environnementales de la SOLIDEO, une étude a été lancée pour évaluer la structuration et la capacité des filières françaises à fournir des volumes de bois français en quantités, en coûts et en délais suffisants. Les conclusions de cette évaluation ont conduit la SOLIDEO à retenir et à imposer à ses maîtres d'ouvrage un minimum de 30% de bois garanti de France métropolitaine.

On observe aujourd'hui l'atteinte de cet objectif par tous les maîtres d'ouvrages. Sur les 15 ouvrages concernés, près de la moitié des approvisionnements des produits bois structurels proviennent de forêts françaises, ce qui représente un peu plus de 13 500 m³ sur les 28 400 m³. Le bilan dressé sur le Village des Athlètes montre lui aussi un large dépassement de l'objectif avec un approvisionnement français porté à 55% et même à 65% si l'on ne comptabilise que le bois structurel, c'est-à-dire 80% des volumes totaux du périmètre.

Provenance du bois du Village des Athlètes

Provenance du bois dans la construction			
Opération	Volume de bois français (m³)	Volume de bois total (m³)	% bois français
Universeine	3 103	5 749	54 %
Quinconces	2 340	4 103	57 %
Belvédères	3 100	4 345	71 %
Ecoquartier Fluvial	1 239	3 568	35 %
Total	9 782	17 764	55 %
Total de bois structurel	9 303	14 289	65 %

Cette réussite a été possible grâce à la filière bois qui a répondu présente en temps et en heure dans les volumes attendus ainsi qu'aux maîtres d'ouvrage qui se sont rapidement saisis du sujet. Il est cependant à noter que ces pratiques d'achat durable et de traçabilité ne sont pas encore installées et demandent à être accompagnées dans la durée. Les revues trimestrielles de suivi des ambitions organisées par la SOLIDEO en présence du maître d'ouvrage, de son assistant à maîtrise d'ouvrage et, le cas échéant, de ses entreprises ont été un

outil d'accompagnement, en permettant des points d'avancement réguliers et la recherche de solutions face aux difficultés rencontrées. Nous nous sommes assurés de la sensibilisation des acheteurs en amont des passages de commande, souvent en y associant le responsable environnement de l'entreprise. Des réunions préparatoires ont permis de les sensibiliser aux enjeux environnementaux liés à l'origine du bois, de l'importance d'intégrer des critères de durabilité dès le départ et d'anticiper les achats pour garantir la disponibilité.

15

OUVRAGES

présentent du bois en structure

pour un peu plus de

28 400

M³

dont

45%

sont d'origine française (le reste européen) et sont intégralement certifiés PEFC ou FSC»

La traçabilité de la chaîne d'acteurs des produits : un enjeu de structuration pour la filière et un enjeu de transparence pour les maîtres d'ouvrage

La SOLIDEO a exigé l'obtention de labels PEFC/FSC pour l'ensemble des produits bois et à la mise en place d'un suivi précis des approvisionnements. Avec l'objectif d'une chaîne d'approvisionnement en cycle court et d'un coût carbone maîtrisé, la traçabilité des matériaux neufs apparaît comme un outil indispensable dans le choix des matériaux de construction. Les maîtres d'ouvrage se sont ainsi engagés dans une démarche de traçabilité, accompagnés en cela par la SOLIDEO et France Bois 2024.

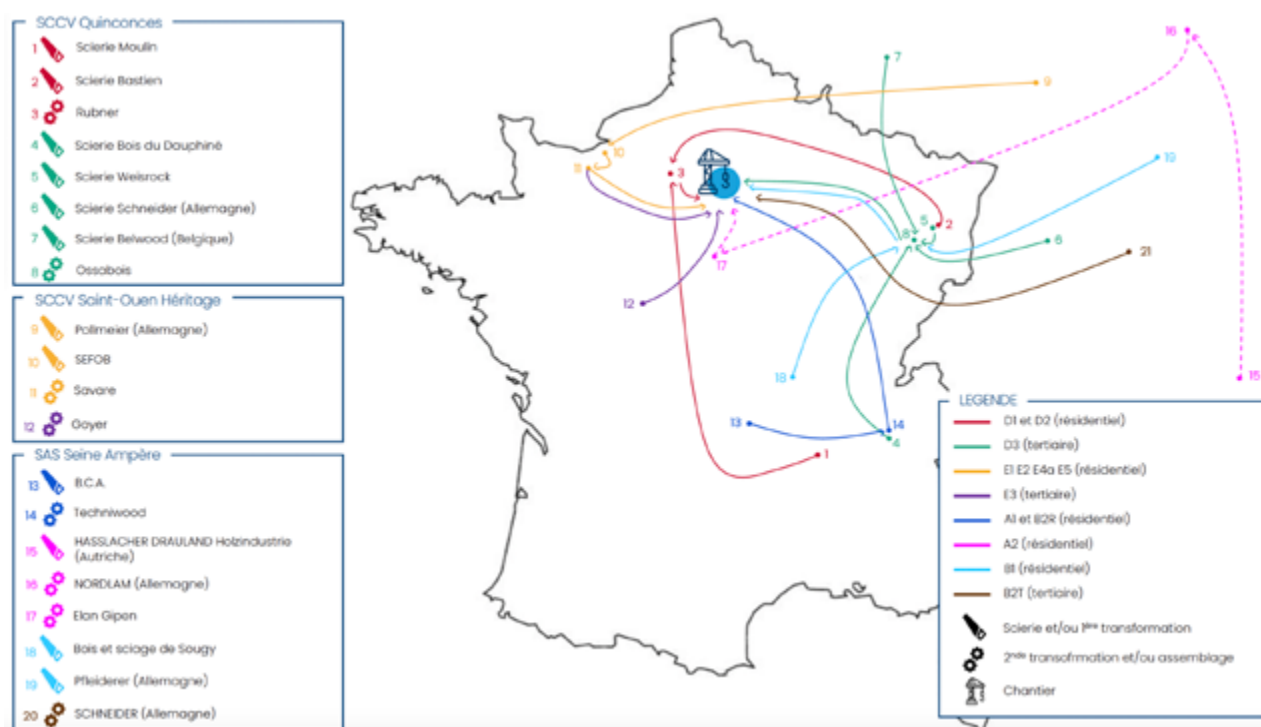
La carte ci-dessous représente l'ensemble des trajets effectués par les façades bois du Village des Athlètes, hors Ile-Saint-Denis, en faisant apparaître chacune des étapes de transformation du matériau. Elle a été établie grâce à la collecte de données issues d'un travail fin de traçabilité mené en interne par la SOLIDEO. Trois quarts des acteurs engagés dans la transformation de ces façades sont présents sur le territoire français métropolitain, le reste se trouvant dans l'Union Européenne (Allemagne, Autriche et Belgique).

Avec un approvisionnement largement issu de forêts françaises, le secteur des Belvédères mobilise une majorité d'entreprises

françaises, notamment en Normandie et en Auvergne-Rhône-Alpes, dans le cadre de la transformation et de la mise en œuvre de ces produits bois. L'intégralité des planchers des bâtiments résidentiels du secteur Quinconces sont quant à eux réalisés par panneaux de bois massif lamellé-croisé issus de forêts du Jura. Les façades de ces bâtiments sont également réalisées en bois français issus de forêts des Vosges et d'Auvergne-Rhône-Alpes.

Les points de difficultés rencontrés pour assurer une traçabilité complète sont liés à la complexité et à la multiplicité de la chaîne d'acteurs.

À nouveau, la sensibilisation des acheteurs en amont des passages de commande revêt une importance capitale pour assurer la continuité et l'efficacité des processus de traçabilité. Il est essentiel d'exprimer clairement quelles données seront attendues (identité du fabricant et/ou du sous-traitant, adresse de l'usine et non du siège etc.) et sous quelle forme elles le seront (bons de livraison, compilation en tableur etc.). Une communication précise sur les attentes permet aux équipes de mieux se préparer et de réduire les risques d'erreurs ou d'omissions. Pour faciliter cette communication, des trames préétablies construites par la SOLIDEO ont été fournies aux maîtres d'ouvrage. En établissant un cadre précis des éléments attendus, les modèles facilitent les échanges et simplifient la consolidation lors de l'analyse des différents livrables récupérés.



2. Les matériaux biosourcés et géosourcés se déclinent dans tous les lots

a. Des ambitions fortes mais une labellisation au cas par cas

Afin d'atteindre les ambitieux objectifs de diminution de l'empreinte carbone, des matériaux biosourcés ou géosourcés ont été mis en œuvre sur les ouvrages olympiques. Outre le bois utilisé en structure, ces matériaux de diverses natures interviennent dans des éléments de second-œuvre : menuiseries, isolants ou encore revêtements.

Lorsque les maîtres d'ouvrages et la SOLIDEO ont considéré que l'utilisation de ces matériaux constituaient un levier majeur pour le respect des objectifs carbone d'un ouvrage particulier, une labellisation biosourcée a été inscrite dans la convention d'objectif. Cette labellisation, qui ne s'applique qu'aux bâtiments neufs, définit des niveaux d'exigences quantitatifs (en fonction de la masse mise en œuvre) et qualitatifs. Trois niveaux sont définis

et correspondent au taux plancher d'incorporation de matière biosourcée, soit : 18kg de matière biosourcée par m² de surface de plancher pour le niveau 1, 24kg/m² pour le niveau 2 et 36kg/m² pour le niveau 3.

Lorsque les ouvrages ne visent pas la labellisation bâtiment biosourcée, le suivi des quantités de matériaux biosourcés mis en œuvre n'est, en revanche, pas systématiquement assuré.

b. Des résultats au-delà des objectifs fixés

Les ouvrages ayant des objectifs de taux d'incorporation de matières biosourcées ont pour la grande majorité dépassé leurs objectifs. C'est notamment le cas de la piscine de Marville qui atteint le niveau 3 pour un niveau 2 visé. Le stade Yves du Manoir est l'équipement sportif comprenant le plus de matériaux biosourcés avec 110kg/m² pour un niveau 1 visé.

Taux d'incorporation de biosourcés des ouvrages olympiques



c. L'isolation biosourcée : une technique à éprouver

Les isolants biosourcés contenant des fibres végétales ou recyclées ont été largement mis en œuvre dans les ouvrages olympiques.

L'ambition initiale était de proscrire complètement les isolants fortement carbonés comme le polyuréthane et le polystyrène. Seulement, des contraintes techniques et réglementaires ont entraîné un assouplissement des prescriptions : notamment l'utilisation de polyuréthane dans les complexes de toitures

végétalisées pour des raisons d'étanchéité et l'utilisation de laines minérales dans les cas où la réglementation incendie l'imposait. Sur le Village des Athlètes, c'est principalement la laine de bois qui a été utilisée, posant de nombreux défis techniques dans les complexes de façade à ossature bois (voir page 44).

Pour la construction du groupe scolaire de Saint-Ouen, les contraintes rencontrées sur les bâtiments du Village ont été évitées grâce

à l'installation de modules de façades sans isolants. En effet, fort de son expérience sur d'autres projets, le groupement a fait le choix de poser l'isolant en laine de bois seulement une fois le hors d'eau réalisé sur les modules

bois préfabriqués. Cette méthode a permis d'éviter tout risque de dégradation des isolants par l'humidité mais limite la préfabrication des éléments.



Le cas particulier de l'isolant biosourcé sur les façades à ossature bois

Une partie des façades à ossature bois (FOB) ou des murs à ossature bois (MOB) du Village des Athlètes ont fait appel à un isolant biosourcé. La mise en œuvre de ces dispositifs a été encadrée par des guides de conception réalisés par le CSTB et différents dossiers d'ATEX. Cette démarche a permis d'identifier et d'anticiper des questions liées à la gestion de l'humidité en phase chantier.

Plus précisément, le complexe de façade faisant l'objet des guides de conception du CSTB est préfabriqué en usine et comprend un pare-vapeur, des plaques de plâtre (BA13), l'isolant ainsi que le pare-pluie. Ces modalités de préfabrication, peu usuelles, destinées à respecter les délais liés aux opérations du Village, impliquent la mise en œuvre sur chantier d'un complexe de façade dans lequel l'isolant n'est pas accessible.

En phase chantier, il existe un risque spécifique d'humidification de la paroi et de l'isolant. Celui-ci n'est pas lié à des infiltrations d'eau liquide en raison de précipitations mais à la propagation de vapeur d'eau (une fois le bâtiment « fermé », avec les menuiseries) lorsque les conditions suivantes sont simultanément réunies :

- la réalisation de certains éléments de second œuvre (chapes, peintures...) entraîne des émissions importantes d'humidité à l'intérieur du bâtiment et/ou ne permet pas l'ouverture des menuiseries ;
- la situation météorologique entraîne des périodes où la température extérieure devient plus importante que la température intérieure.

Cette situation peut provoquer des inversions de flux de vapeur dans la paroi (non plus uniquement de l'intérieur vers l'extérieur, avec une paroi transpirante, mais de l'extérieur vers l'intérieur). Ces inversions de flux peuvent conduire à de la condensation contre le pare-vapeur à l'intérieur de la paroi de la façade, ce qui peut remettre en cause ses performances en matière d'isolation et entraîner à terme un risque de développement fongique.

La gestion de ce risque nécessite de la part des entreprises un suivi très fin de l'humidité lors du chantier. Ce suivi implique :

- la mise en œuvre d'un important dispositif de monitoring, consistant à placer des capteurs dans les façades des bâtiments pour suivre l'évolution des taux d'humidité, en fixant des seuils d'alerte ;
- des mesures correctives à mettre en place en fonction du dépassement de ces différents seuils :

- la ventilation naturelle des espaces par l'ouverture des menuiseries afin de préserver au maximum l'équilibre hygrothermique entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment ;
- la mise en place de dispositif de chauffage et de déshumidification dans le bâtiment, afin d'empêcher les inversions de température et donc de flux de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur ;
- lorsque cela est nécessaire, et après sondage, le remplacement d'éléments de façades endommagés.

L'ensemble de ces mesures implique un engagement fort de la part des entreprises ainsi que, probablement, la programmation de formations spécifiques.

Les contraintes importantes de coactivité et de délais des chantiers olympiques, combinées aux durées importantes de travaux et aux impératifs de phasage ont conduit un maître d'ouvrage à renoncer à la mise en œuvre de l'isolant biosourcé sur une partie des façades.

Il n'y a pour autant pas d'impossibilité technique : des solutions existent et ont permis le maintien de l'isolant biosourcé sur une large majorité des plots du Village.

Un retour d'expérience, en coordination avec les acteurs techniques et les entreprises, sera organisé par la filière bois pour consolider les protocoles de suivi et ainsi faciliter la mise en œuvre sur de futures opérations.

Différents types d'isolants biosourcés ont été mis en œuvre sur les ouvrages olympiques :

- la laine de bois ou fibre de bois mise en œuvre sur une grande majorité des ouvrages dont le Village des Athlètes ;
- un isolant composé principalement de coton recyclé (Métisse) au sein des écoles du Bourget, de l'Arena de la Porte de la Chapelle ;
- un isolant à base de chanvre, lin et coton (Biofib) pour la Marina du Roucas Blanc à Marseille.

Pour les produits biosourcés récemment mis sur le marché, les champs d'application sont spécifiques ce qui rend leur application encore assez contrainte. Sur le projet de l'Arena de la Porte de la Chapelle, un des retours d'expérience est qu'il a été difficile de lever les freins réglementaires sur la mise en œuvre de l'isolant Métisse sur des applications non éprouvées. De nombreux échanges ont eu lieu avec le bureau de contrôle qui a finalement exigé la vérification du système de pose quasiment pour chaque cloison.

Les ouvrages olympiques ont donc pu contribuer à faire avancer techniquement des solutions d'isolations biosourcées ainsi qu'à éprouver des produits biosourcés en développement.

d. Murs biosourcés et géosourcés : de véritables innovations

Certains ouvrages ont fait le choix de mettre en œuvre des murs en béton de chanvre

notamment le lycée Marcel Cachin et un secteur du Village des Athlètes ou des murs en brique de terre crue sur l'Arena Porte de la Chapelle. Ces procédés encore extrêmement innovants ont nécessité de lever certains freins avec plus ou moins de succès.

Le chantier du lycée Marcel Cachin a été le premier chantier à utiliser des panneaux préfabriqués ossature bois, isolés en béton de chanvre et fabriqués en France. L'usine de l'entreprise Wall'Up a été lancée pour l'occasion en Seine-et-Marne, elle s'appuie sur des circuits courts puisque le chanvre est cultivé par une centaine d'agriculteurs dans le même département. Ce type de produit entre largement dans une logique bas-carbone puisque son impact est dix fois moindre qu'un produit de même type en béton.

Si le produit était intrinsèquement près pour une mise en œuvre sur chantier – la méthodologie de transport n'était pas encore au point – un grand nombre de retouches ont été nécessaires pour arriver à un rendu satisfaisant. Les panneaux de façades devaient initialement arriver 100% réalisés. Devant l'état de surface des premiers panneaux arrivés, les suivants ont été livrés sans enduit ni finition afin de ne pas avoir à les faire deux fois (en usine puis sur le chantier).

Une démarche intégrant également du béton de chanvre a été conduite sur le Village des Athlètes, avec moins de succès puisqu'elle n'a pas reçu les autorisations nécessaires pour être réalisée (voir page 45).



Mise en œuvre de l'isolation des façades du VOP



Le béton de chanvre sur le Village des Athlètes

La SCCV Saint-Ouen Héritage, en charge de la réalisation du secteur E du Village des Athlètes, a mis en œuvre sur un bâtiment le remplissage en béton de chanvre des façades murs à ossature bois (MOB). Ce projet a fait l'objet d'une dotation au titre du Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO, d'abord pour une phase de R&D puis pour la mise en œuvre du dispositif de façade.

La SCCV a donc engagé une démarche d'innovation autour du dispositif, avec pour objectif l'obtention d'une ATEEx permettant la réalisation du projet. La constitution du dossier d'ATEEx, au cours de l'année 2021, a requis un grand nombre d'études et de modélisations dont les conclusions se sont révélées non satisfaisantes au regard des choix constructifs retenus.

De nombreux essais autour de la propagation de l'humidité dans le bois d'ossature ont été

réalisés et ont conduit à des résultats non satisfaisants concernant la préservation de l'intégrité du bois en ossature (BauBuche en hêtre, bois lamellé-collé). Des travaux de modélisation des transferts d'humidité dans le dispositif de façade ont également été menés mais la complexité des processus à l'œuvre n'a pas permis de corroborer les observations faites lors des essais.

Le comité d'ATEEx a donc émis un avis défavorable et le projet d'innovation n'a pas été mis en œuvre, les contraintes de délais n'autorisant pas la poursuite des études. Toutefois, les premiers résultats ne remettent pas en cause l'utilisation du chanvre sur mur à ossature bois. Ils permettent d'identifier un certain nombre de dispositions à respecter, dans le choix des essences de bois et les modalités de mise en œuvre du chanvre.

Au contraire des matériaux biosourcés, massivement mis en œuvre dans les projets des ouvrages olympiques, les solutions constructives avec matériaux géosourcés sont moins nombreuses et tiennent lieu de démonstrateurs. Des briques de terre crue ont été mises en œuvre sur le chantier de l'Arena Porte de la Chapelle ainsi qu'en cloisonnement provisoire pour la phase jeux dans le secteur Universeine du Village des Athlètes.



La brique de terre crue sur l'Arena Porte de la Chapelle

Grâce à un financement du Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO, la Ville de Paris a mis en œuvre des cloisons intérieures en terre



Murs en brique de terre crue dans le hall de l'Arena Porte de la Chapelle

crue sur l'Arena Porte de la Chapelle. 213 m² de cloisons ont ainsi été réalisées en briques de terre crue (BTC) non porteuses, respectant une résistance coupe-feu d'une heure.

Les briques proviennent de la fabrique Cycle Terre située sur la commune de Sevran, qui a malheureusement fermé depuis, et qui proposait différents matériaux de second œuvre issus des déblais des chantiers du Grand Paris Express. Elles ont ainsi été fabriquées avec 70% de déblais des chantiers du Grand Paris Express.

Ce sont 84 mètres linéaire qui ont été montés au RDC de l'Arena, sur une hauteur de 2,20 mètres, permettant d'utiliser une ressource géosourcée locale et recyclée dans une démarche d'économie circulaire.

e. Revêtements de sols

Malgré le faible poids carbone des revêtements de sols, des solutions biosourcées variées ont également été mis en œuvre sur les ouvrages olympiques.

Sur le VOP, les revêtements de sol sont majoritairement biosourcés (parquet ou en linoléum). La proscription du PVC prévue initialement a été levée à la marge, notamment sur les circulations collectives d'immeubles de logements, où il reste préférable à la moquette en matière de bilan carbone. Le linoléum est donc présent dans de nombreux ouvrages quand l'utilisation le permet comme pour la Marina du Roucas Blanc. Cependant son usage reste peu fréquent pour les sols sportifs où le PVC dispose des spécifications techniques requises.

L'utilisation de certains revêtements biosourcés peut également être freinée par le manque de retour d'expérience. Cela a été le cas sur le groupe scolaire de Saint-Ouen où un sol coulé en liège avait été imaginé en conception

comme revêtement de la cour élémentaire située en R+2. Or le futur gestionnaire du bâtiment a émis des doutes sur la durabilité du sol, notamment en présence active d'enfants. Aucun autre projet d'école ou de groupe scolaire pour lesquels ce produit aurait été mis en œuvre n'a été trouvé ; de façon générale, c'est un matériau plutôt installé dans des espaces de plus petite surface ou encore dans des espaces privés, moins fréquentés. Finalement, le groupement constructeur a mis en œuvre des dalles céramiques sur plots de couleur claire qui contribuent à limiter l'effet d'ilot de chaleur urbain.

f. Le biosourcé en toiture

La toiture végétalisée de la grande salle de l'Arena Porte de la Chapelle de 6 147m² est constituée d'un complexe de toiture innovant Phonotech. Ce dispositif de toiture de la grande salle alliant un complexe acoustique Phonotech biosourcé à une toiture végétalisée est à ce jour inédit. La toiture végétalisée de l'Arena est la deuxième plus grande toiture végétale de Paris après celle du parc des expositions de Versailles.



Un complexe de toiture acoustique biosourcé et végétalisé

La toiture végétalisée de l'Arena Porte de la Chapelle est constituée d'une membrane d'étanchéité posée sur un support isolant thermo-acoustique en panneaux Phonotech. Il s'agit d'un épais complexe de toiture posée sur une charpente métallique et composée notamment de panneaux de bois aggloméré et d'un matelas de coco. Un géotextile et une membrane assurent l'étanchéité du dispositif, qui accueille une végétalisation extensive.

Ce projet, porté par la Ville de Paris et soutenu par le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO a été initialement retenu pour ses propriétés acoustiques. En effet, le site se situe à proximité d'immeubles résidentiels, ce qui a nécessité une réduction du bruit entre l'intérieur et l'extérieur du stade. La mise en place de cette toiture innovante a également permis la mise en œuvre de 340 tonnes de matériaux biosourcés pour un ratio de 51,90 kg/m², participant grandement à l'obtention du niveau 3 du label biosourcé.



Toiture Phonotech Arena Porte de la Chapelle

3. Le béton bas-carbone : un outil complémentaire à la réduction des émissions carbone de la construction

Les données de l'observatoire E+C- montrent que la part des émissions liée au gros œuvre (fondations, infrastructure et superstructure, traditionnellement fait à plus de 82% de béton et d'acier) représente 36% pour le logement collectif et 32% pour le tertiaire.

Par la variabilité des caractéristiques et des quantités des ressources entrant dans la composition du béton, plusieurs centaines de formulations différentes de bétons existent aujourd'hui sur le marché. De fait, selon l'usage du bâtiment (résidentiel, tertiaire équipement sportif etc.) et selon les contraintes techniques du chantier (classe de résistance, classe d'exposition etc.), l'empreinte carbone du béton varie fortement. La raison principale de cette variation est la composition du ciment. Pour un béton coulé fabriqué à partir d'un ciment traditionnel, souvent un ciment Portland aussi noté CEM I, le ciment est le composant présentant le poids carbone le plus important, à hauteur de 98% du poids carbone, bien qu'il ne représente que 12% de la masse volumique.

C'est donc sur la composition et le procédé de fabrication du ciment que reposent les innovations en matière de béton dit bas carbone. Par béton bas carbone, il est entendu des bétons qui, pour des propriétés, des performances, des qualités d'usage et une durabilité équivalente à celles d'un béton de référence, génèrent des émissions de GES inférieures à celles de celui-ci mais il n'existe pas de cadre normatif ou réglementaire à leur sujet. De manière générale, la réalisation d'un béton bas carbone consiste à remplacer le clinker (élément carboné du ciment, devant être chauffé à très haute température) par des produits de substitution comme les laitiers de hauts fourneaux, co-produits de l'acier. Dans le cas de bétons dits ultra bas carbone, la substitution est totale. Différents types de ciments aux teneurs en clinker variables peuvent donc être produits. Le poids carbone des bétons coulés d'un chantier conventionnel se situe entre 250 kgCO₂eq/m³ et 350 kgCO₂eq/m³ tandis que des valeurs entre 150 kgCO₂eq/m³ et 180 kgCO₂eq/m³ caractérisent un chantier particulièrement attentif à la maîtrise de son impact carbone.

La terminologie de béton bas carbone ne faisant pas l'objet d'une définition officielle, ce sont des seuils compris entre 150 kgCO₂eq/m³ et 157 kgCO₂eq/m³ hors ferrailage

que la SOLIDEO a retenus et a imposé à ses opérateurs immobiliers pour les bétons coulés. Pour les éléments préfabriqués, le caractère bas carbone a également été recherché mais sans être imposé car les retours d'expérience sur ces produits n'étaient pas suffisamment avancés. La généralisation des ciments à prise rapide (CEM I) a été évitée au profit d'autres méthodes d'activation (étuvage, activation chimique par exemple) sans remettre en cause les rythmes de production.

a. La mise en place d'une stratégie fine pour favoriser l'intégration de formulations alternatives

Tout au long des différentes phases de conception, la SOLIDEO a suivi les projections de bilan carbone réalisées par les bureaux d'études et les entreprises de construction. Ces projections ont mis en évidence la nécessité d'une utilisation ambitieuse de bétons bas carbone.

La SOLIDEO a engagé avec les opérateurs des lots immobiliers des Villages une démarche de reporting trimestriel afin de mesurer la trajectoire carbone au fil de la réalisation du projet et d'identifier des pistes d'optimisation. Le suivi carbone des projets a été assuré par la mise en place de tableaux de suivi des métrés et des FDES (fiche de déclaration environnementale et sanitaire) pour les bétons et tous les autres matériaux des bâtiments. Ces tableaux permettaient d'identifier tout écart par rapport à la conception.

Au début des travaux, chaque entreprise générale a fourni, pour visa auprès de la maîtrise d'œuvre, le planning prévisionnel de coulage de l'ensemble des ouvrages en béton et le quantitatif de chaque type de produit béton en caractérisant le type de béton et en joignant la FDES correspondante. Ce détail quantitatif a servi de trame pour établir un tableau de bord du suivi de l'impact carbone du béton armé pour toute la durée du chantier. Un envoi mensuel de ce tableau de suivi des bétons à la SOLIDEO a été instauré pour visualiser l'évolution des quantités et des formules de béton coulé durant le mois précédent. En complément, un tableau de synthèse pour l'ensemble des matériaux était tenu à jour par l'entreprise générale de chacun des bâtiments où étaient indiquées la référence des matériaux, leur localisation de

mise en œuvre, la quantité et la FDES associée, pour apporter la preuve soit de l'utilisation du produit spécifique prévu à cette phase, soit d'un poids carbone inférieur ou égal du produit de substitution.

b. Le recours à des bétons bas carbone a été généralisé dès que possible

À l'heure de la réception des ouvrages olympiques, les bilans de travaux démontrent une généralisation du recours aux bétons bas carbone de type CEM III et des poids carbone réduits et maîtrisés. Un peu plus de 120 000 m³ de béton ont été coulés sur le Village des Athlètes parmi lesquels la moitié a été réalisée en formulations bas carbone selon les critères imposés par la SOLIDEO.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette nouvelle pratique de suivi de l'impact carbone des bétons. Les analyses qualitatives et quantitatives des bilans de béton et d'acier dressé sur le secteur Aire des Vents du Village des Médias et le secteur Quinconces du Village des Athlètes permettent de formuler plusieurs observations :

Tout d'abord, malgré un suivi attentif de la SOLIDEO et un engagement marqué des opérateurs immobiliers, les résultats des poids carbone des bétons coulés n'atteignent pas exactement les objectifs escomptés. Si 78% de bétons coulés sur l'Aire des Vents ont un impact carbone inférieur à 180 kgCO₂eq/m³, seuls 10% des bétons coulés respectent l'exigence d'un poids carbone inférieur à 150 kgCO₂/m³. Le facteur d'émission moyen sur l'ensemble du secteur Quinconces des bétons coulés est lui de 165 kgCO₂eq/m³. Ces résultats restent néanmoins très prometteurs et démontrent que la généralisation de formulations bas carbone est concrètement possible.

De fait, l'objectif prescrit était très ambitieux, et atteindre le seuil de 150 kgCO₂/m³ s'est révélé très difficile en raison de contraintes techniques et de limitations sur le chantier. Ces difficultés de mise en œuvre sur le chantier sont liées aux propriétés des bétons bas carbone, et en particulier aux conditions de coulage de température et d'hygrométrie particulières (plage optimale d'utilisation entre 5°C et 15°C avec une faible humidité ambiante) qu'ils requièrent, mais aussi à une moins bonne maîtrise du rendu esthétique par les entreprises,

qui ne garantissent pas l'homogénéité surfacique (aspect farineux et teinte différentes). En raison de la réduction de la quantité de clinker intégrée au ciment, le temps de séchage des bétons bas carbone est allongé par temps froid, ce qui peut ralentir les cadences usuelles de chantier (nécessité de coffrer plus longtemps, besoin de plus d'éléments de coffrage) et venir en conflit avec les impératifs de planning. En conséquence, les constructeurs recourent à la stratégie «le meilleur béton au meilleur moment» et s'adaptent ainsi aux contraintes saisonnières. Cette stratégie implique notamment l'utilisation sur les chantiers d'un nombre très important de bétons différents, jusqu'à plusieurs dizaines sur un même îlot bâtiminaire, ce qui permet d'adapter le coulage :

- aux classes de résistance souhaitées en fonction de l'ouvrage réalisé ;
- aux conditions météorologiques ;
- à la qualité des terres en contact dans le cas de l'infrastructure, le coulage de bétons bas carbone étant plus complexe au contact de terres polluées notamment.

A titre d'exemple pour illustrer ce dernier point, des formulations bas carbone dans les fondations ont dû être modifiées pour certains plots résidentiels du secteur Quinconces à la suite de la découverte de terres polluées. Le contact avec des terres sulfatées est en effet incompatible avec la mise en œuvre de bétons bas carbone en raison de réactions chimiques indésirables. En raison de cette incompatibilité technique imprévue, un dépassement de 12% de l'objectif de carbonation des bétons a été observé. Le poids carbone a cependant été globalement maîtrisé avec un résultat de 176 kgCO₂eq/m³.

Quant aux ilots de bureaux, les poids carbone des bétons coulés affichent des valeurs très encourageantes. Pour les 4 bâtiments étudiés, l'impact des bétons coulés, calculé hors ferrailage, varie entre 145 kgCO₂eq/m³ et 153 kgCO₂eq/m³. Ceci est remarquable car il est en principe plus difficile d'être vertueux sur de la construction tertiaire que résidentielle.

Cette réussite est notamment attribuée à la mise en œuvre des formulations très peu carbonées d'EXEGY sur les ilots de bureaux du secteur Universeine (voir page 52). En tenant également compte des poids carbone

des aciers de ferrailage pour un ratio moyen calculé à 140 kgCO₂eq/m³, les poids carbone des bétons armés des plateaux de bureaux atteignent une valeur moyenne de 286 kg-CO₂eq/m³ ce qui est bien plus faible que des valeurs habituellement estimées aux alentours de 350 kgCO₂eq/m³.

Pour une évaluation complète de l'empreinte carbone du béton armé, il faut en effet également prendre en compte l'impact carbone des aciers qui le composent, d'autant que les retours d'expérience sur les chantiers ont mis en évidence des sur-ferrailages ponctuels de bétons bas-carbone pour assurer une sécurité structurelle supplémentaire. Aussi, certaines techniques constructives nécessitent la mise en œuvre de plus d'aciers que d'autres. Sur l'ilot B2T du secteur Universeine, la solution de plancher champignon retenue au titre d'une facilitation de la réversibilité du bâtiment entre son usage en phase jeux et héritage se traduit par une augmentation du ferrailage estimée à 517 tonnes d'acier.

c. L'absence de définition officielle freine la mise en commun des retours d'expérience

La plupart des opérateurs sur le chantier et des bureaux d'étude utilisent le critère du type de ciment pour définir le caractère bas carbone

de leurs bétons. La formulation CEM III est privilégiée car elle est adaptée à plusieurs typologies de travaux et contient un taux réduit de clinker. Toutefois, les parties s'accordent pour dire que le seul critère du type de ciment utilisé n'est pas décisif sur cette caractérisation et que le poids carbone du béton doit également être regardé. Une démonstration par l'exemple a été menée sur 6 ilots résidentiels du secteur Quinconces. Le tableau ci-dessous consigne les différents volumes de bétons comptabilisés comme bas carbone selon la méthodologie employée pour définir un béton bas carbone :

- méthodologie 1 : Sont retenus les volumétries de tous les bétons ayant un poids carbone (hors ferrailage) inférieur à 155 kgCO₂eq/m³ ;
- méthodologie 2 : Sont retenus les volumétries de tous les bétons formulés à base de CEM III (36 et 80 % de laitier de haut-fourneau) ;
- méthodologie 3 : Sont retenus les volumétries de tous les bétons formulés à base de CEM III ou de CEM II+S (6 et 35 % de laitier de haut-fourneau).

Le simple constat, ici illustré, du manque d'un cadre technique compréhensible et partagé par tous explique en grande partie la difficulté de suivi des bétons de formulations dites bas carbone.

Volume de béton bas-carbone selon les définitions

Méthode pour comptabiliser un béton comme bas carbone	Volumes (m ³)
1. Facteur d'émission du béton ≤ 155 kgCO ₂ eq/m ³	1 093
2. Formulation du béton à base de CEM III	2 294
3. Formulation du béton à base de CEM III ou de CEM II+S	10 508

d. L'échec de l'intégration de granulats recyclés dans les bétons

Dans une logique d'économie de matière et d'économie circulaire, l'intégration de granulats recyclés avait été encouragée par la SOLIDEO à hauteur de 30% pour les fondations. Sur le secteur Quinconces, une étude de la faisabilité de cette prescription a été réalisée en phase conception. L'analyse des documents réglementaires (norme NF EN 206/CN) a

montré que les textes normatifs n'autorisaient pas la mise en œuvre de granulats recyclés dans la réalisation de béton de fondation de type XA2 (type de fondations utilisé dans ce lot). Une étude comparative du bilan carbone d'un béton sans et avec introduction des granulats recyclés de type 1 à hauteur de 60% a également été conduite. Il s'est avéré que le gain induit par la présence de ces granulats sur le poids carbone du béton était inférieur à l'effet de la hausse du volume de béton ajouté

pour compenser la réduction de la résistance mécanique due à la présence de ces granulats. Ainsi, une formulation avec granulats recyclés n'a pas d'impact positif sur le bilan carbone. A ne pas négliger, toutefois, l'impact positif de l'utilisation de ces granulats sur l'épuisement des ressources naturelles. Cet autre aspect n'a pas été pris en compte dans l'étude fournie par le groupement, qui a renoncé à l'ajout de granulats recyclés.

Au vu de ce constat, il apparaît que l'objectif initial aurait dû être mieux défini. Il aurait été plus pertinent de prescrire cet objectif sur les bétons de superstructure plutôt que sur ceux d'infrastructure étant donné que les bétons de fondations sont soumis à de plus fortes

contraintes techniques. De plus, le suivi de chantier s'est davantage orienté sur l'objectif de béton bas carbone que sur celui de béton recyclé. Cette expérience offre l'opportunité de réinterroger l'approche et d'affiner les objectifs pour l'avenir.

e. La concrétisation de projets innovants en béton ultra bas carbone

Plusieurs projets ont eu ponctuellement recours à des formulations de bétons à des niveaux de carbone inférieurs à 100 kgCO₂/ m² SDP. On retrouve dans ces projets deux bétons innovants : la gamme Exegy de VINCI Construction France et le béton H-UKR de l'entreprise Hoffmann Green.



Coulage de béton



Une des centrales à béton sur chantier



Les bétons ultra bas carbone EXEGY sur Universeine

Sur le secteur Universeine du Village des Athlètes, 18 584 m³ de béton ultra bas carbone ont été mis en œuvre :

- 6 147 m³ pour les radiers en EXEGY UBC*
- 12 437 m³ pour les planchers en EXEGY ULTRA.

L'utilisation de bétons ultra bas carbone dans de telles quantités n'avait jamais été mise en œuvre en France. Longtemps peu utilisés pour des critères techniques et économiques, ces bétons ont pourtant l'avantage d'être peu émissifs en carbone et devraient s'imposer à termes comme une des réponses aux enjeux réglementaires de la RE2020.

Cette innovation est portée par BATEG, sur un projet dont la MOA est assurée par Vinci IMMOBILIER, en partenariat avec ECOCEM, spécialiste dans le développement, fabrication et fournisseur de ciment pour la « Construction Bas Carbone ». Le projet a été financé par le Fonds Innovation et Ecologie de la SOLIDEO à hauteur de 993 000 €HT.

Le béton est le matériau le plus utilisé sur les chantiers avec un poids carbone élevé, lié principalement au ciment. Le clinker, son constituant principal (produit par cuisson de calcaire et d'argile), est responsable de la forte empreinte carbone du ciment en raison de :

- la chauffe du four des cimenteries à 1500°C ;
- la réaction chimique de libération du carbone lors de la cuisson.

Pour réduire l'empreinte carbone des bétons, il faut donc agir sur le ciment et réduire la part de clinker.

Le béton UBC dit très bas carbone est constitué à 65 % de laitiers de haut fourneau issus de l'industrie sidérurgique. Il a un impact carbone

d'environ 150 kgCO₂eq/m³**, inférieur de 40 % par rapport à un béton classique de type CEM I. Le béton ULTRA est lui constitué exclusivement de laitiers activés, donc sans clinker. Il a un impact carbone d'environ 100 kgCO₂eq/m³**, soit -60 % par rapport au béton classique.

Cette innovation a permis de réduire l'impact carbone sur les ouvrages réalisés d'environ 55 % par rapport à une solution en béton traditionnel.

Comme pour tout béton sortant du cadre normatif, des essais ont été réalisés permettant de justifier d'une durabilité de 50 ans (carbonatation, alcali-réaction) et de l'utilisation des règles usuelles de dimensionnement selon l'Eurocode 2 en vérifiant en particulier la résistance en compression, la résistance en traction, le module d'élasticité, la loi de comportement (relation contrainte/déformation), le retrait, le fluage, la tenue au feu. Les essais effectués ont permis de vérifier que son comportement structurel était similaire à celui d'un béton traditionnel (à base de ciment manufacturé) pour différentes classes de résistance.

La prise très lente des bétons au laitier activé, notamment par temps froid, a contraint à l'adaptation de sa mise en œuvre. Il a été nécessaire de recourir au chauffage des éléments concernés et dû prévoir une immobilisation de coffrage conséquente. Ce dispositif consiste en l'installation de portiques de 12 m x 6.00 m maintenant des bâches à 60 cm du sol. Deux soufflants de 12 kW sont installés par portiques, avec un impact carbone estimé à 5 kgCO₂eq/m³. Ces bâches isolantes permettent de maintenir une température > 20 °C au-dessus du plancher, elles ont permis de tenir le planning des travaux de gros-œuvre.

*Ultra Bas Carbone

** La mise à jour des facteurs d'émission est attendue pour la fin 2024



Le béton très bas carbone HOFFMANN GREEN sur l'Arena Porte de la Chapelle

La solution du Béton H-UKR est basée sur l'utilisation du co-produit « laitier de haut fourneau » issu de l'industrie sidérurgique. Le système d'activation du ciment H-UKR permet d'utiliser ce co-produit sans aucun ajout de clinker dans sa formulation.

Il a un impact carbone d'environ 85 kgCO₂eq/m³, inférieur de 65 % par rapport à un béton de base de type CEM I. La mise en œuvre de ce béton sur l'ARENA 2 a été réalisée pour des voiles banchés (232 m³), un escalier préfabriqué (11 m³) et les installations de chantier (13,5 m³).

4. Des aménagements paysagers pensés pour la sobriété carbone

La limitation de l'impact carbone du franchissement de l'A1 entre Dugny et Le Bourget a été poursuivie au-delà de la structure du tablier. Pour les aménagements paysagers, les parois berlinoises initialement prévue en conception ont été substituées par des remblais renforcés. Cette modification constructive a été décidée sur la base de la mise à jour du calcul du bilan carbone en phase APD, qui avait chiffré les parois berlinoises comme le poste le plus impactant de l'ouvrage avec une part à 44%. De plus, l'impact financier de ces parois était conséquent, ce qui a d'autant plus motivé l'équipe à se concentrer sur la recherche d'une variante pour le renforcement du talus. La solution d'une rampe mise en œuvre à partir de remblais et de remblais structurels a ensuite été retenue.

Ces remblais nécessitaient une quantité de terre importante mais similaire à la quantité nécessaire pour la paroi berlinoise et n'ont donc pas induit de surcoût lié à l'impact de mouvements de terre supplémentaires. Le lieu d'approvisionnement de ces terres a néanmoins été réfléchi par l'entreprise qui a proposée de réutiliser des terres issues de chantiers à proximité. Le volume de ces remblais a aussi pu être limité par l'insert de

renforcements structurels de type géogrilles entre des couches de terre, permettant de réduire le volume de terres nécessaires et contribuant au renforcement de la stabilité de l'ouvrage. Cette technique a permis également d'intégrer davantage de plantations avec les surfaces en pentes sur les côtés de la promenade qui ont pu être végétalisées.

Finalement, cette modification a permis d'éviter d'importantes quantités d'acier et de béton tout en limitant les apports massifs de terre de remblais et en augmentant la part de surfaces végétalisées du projet. Le gain carbone de cette technique est cependant difficile à évaluer. L'économie de carbone correspond au volume de béton de la paroi et des pieux et aux profilés métalliques. Il a été évalué à environ 750 tCO₂eq. En comparaison, la solution des remblais renforcés a été évaluée à 110 tCO₂eq. A l'impact de la géogrille s'est ajouté celui du treillis soudé et des inclusions rigides en béton requises au regard du contexte géotechnique du site. Ces dernières ont été réalisées avec une formulation à partir de CEM III/B. Cette solution a ainsi permis de diviser par sept le poids carbone du renforcement des talus et de diminuer considérablement le bilan carbone du franchissement.



Aménagements paysagers de la Passerelle du Bourget

F. L'EXPLOITATION BAS-CARBONE

Le bilan carbone des opérations considéré par la SOLIDEO intègre 50 ans d'exploitation des ouvrages, tel que défini dans les normes (sans préjuger de leur durée de vie réelle, qui sera certainement supérieure à 50 ans). Cette innovation méthodologique est aujourd'hui intégrée de la RE2020 avec des ratios similaires, qui permettent de prendre en compte à leur juste niveau la performance énergétique des bâtiments et leur raccordement à des sources d'approvisionnement énergétique vertueuses.

La SOLIDEO a fixé des objectifs de sobriété énergétique pour les ouvrages en construction ou en rénovation, en fixant une valeur plafond pour leurs besoins énergétiques (par unité de surface de plancher). En tenant compte des typologies de bâtiments et en préservant la possibilité d'une mixité des usages des toitures, la SOLIDEO a également fixé des objectifs en matière de production d'énergie solaire

photovoltaïque. Enfin, à chaque fois que cela est possible, les ouvrages olympiques s'appuient sur des infrastructures énergétiques existantes ou créées dans le cadre des projets d'aménagement pour la fourniture de chaleur et de froid. Ces projets ont également créé des opportunités d'extensions de réseau accompagnées de nouvelles capacités de production de chaleur renouvelable ou de récupération (comme sur le Village des Athlètes ou l'Arena Porte de la Chapelle). La majorité des grands ouvrages neufs est raccordée à des réseaux existants, en extension ou en création, avec des taux d'énergie renouvelable compris entre 50 et 70%. Le Village des Médias a donné l'opportunité à l'EPT Paris-Terres-d'Envol de créer un réseau de chaleur entièrement neuf alimenté par une géothermie au Dogger qui desservira les villes de Dugny et du Bourget, ainsi que l'aéroport du Bourget.

1. Viser la sobriété énergétique

Le premier enjeu de l'exploitation bas-carbone des ouvrages est la sobriété, c'est-à-dire la réduction à la source des consommations portant sur tous les postes : chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation, éclairage, etc.

a. Ambitions sur les niveaux de performance énergétique, niveaux E+C-

L'optimisation de la performance énergétique des ouvrages a été traitée avec soin dans le contexte d'opérations complexes qui implique de trouver un juste équilibre entre trois enjeux souvent perçus comme antagonistes : réduction des besoins énergétiques (chaleur, froid et électricité), fonctionnalité et confort (luminosité notamment), et enfin adaptation au réchauffement climatique à long terme, en anticipant le climat de 2050.

Les prescriptions de la SOLIDEO visaient la sobriété énergétique en tenant compte des spécificités de chaque projet :

- pour l'Arena Porte de la Chapelle, qui est un ouvrage complexe du fait de son usage multifonctionnel en phase jeux puis en phase héritage, les objectifs ont été déterminés sur la base d'un parangonnage, réalisé avec la maîtrise d'ouvrage et ses AMO, et sécurisé par un dispositif de garantie de performance énergétique en exploitation ;

- pour les écoles du Bourget, les objectifs ont été calés au niveau des meilleures pratiques actuelles pour un groupe scolaire, à savoir la labellisation Passivhaus, associée à un mécanisme de garantie de résultat énergétique ;
- dans les stades mis en conformité et rénovés, les travaux influent peu sur les performances énergétiques. Les objectifs relèvent d'obligations de moyens, comme la mise en œuvre d'éclairage LED performant ;
- les centres aquatiques sont des projets complexes présentant des enjeux importants en matière de consommation énergétique : production de chaleur, déshumidification de l'air, consommation électrique des systèmes de ventilation, filtration. La SOLIDEO a donc fixé des objectifs spécifiques en fonction de la programmation de chaque piscine.

En Île-de-France, une piscine « classique » avec un bassin de nage et un bassin ludique peut consommer plus de 3 000 kWh/m² de bassin par an pour le chauffage tandis qu'une piscine performante consommera environ 1 700 kWh / m² de bassin. Les consommations électriques, autres que celles de chauffage, sont de l'ordre de 1 600 kWh/m² de bassin. Ces ratios

dépendent naturellement de la programmation de l'opération : surface de bassin, présence de bassin nordique, zone de bien-être, etc.

Les objectifs initiaux de consommation énergétique pour les piscines du programme olympique sont les suivants : une consommation annuelle de chaleur inférieure à 1 700 kWh/m² de bassin intérieur et une consommation électrique annuelle (hors chauffage) inférieure à 1 200 kWh/m² de bassin. Ces valeurs sont déclinées en concertation avec les différents maîtres d'ouvrage afin de tenir compte des spécificités de chaque opération.

En parallèle des niveaux de consommation imposés, la SOLIDEO a également utilisé la labellisation E+C- comme objectif, sauf pour les ouvrages n'étant pas soumis à la réglementation thermique à laquelle s'adosse le référentiel Énergie-Carbone, comme les piscines par exemple. Le niveau E3 a été en majorité imposé : il correspond à un bâtiment très sobre et ayant recours à des énergies renouvelables et de récupération. Le niveau E4, correspondant à un bâtiment producteur d'énergie, n'a pas été recherché car il n'est atteignable que dans des cas exceptionnels et ne rentre pas dans la logique de répliquabilité de la stratégie environnementale de la SOLIDEO.

b. Optimiser l'efficacité énergétique du bâti

L'efficacité énergétique du bâti neuf est mesurée dans la réglementation thermique par le coefficient du Bbio ou Besoin Bioclimatique. Ce coefficient est un outil de mesure de la performance du bâti indépendant des systèmes énergétiques utilisés. Le Bbio doit être inférieur au Bbio max défini par la réglementation : plus le Bbio est faible moins le bâtiment sera consommateur d'énergie.

Ainsi, sur la plupart de ses ouvrages, la SOLIDEO a imposé le Bbio comme un des objectifs de performance énergétique :

- pour les bâtiments de logements, Bbio ≤ Bbio max - 40% et visant - 50%
- pour les bureaux et les hôtels, Bbio ≤ Bbio max - 35%
- pour les groupes scolaires, Bbio ≤ Bbio max - 35%

Ces objectifs ayant été défini très tôt dans les programmes, ils sont calqués sur l'utilisation du Bbio issu de la RT2012. Le calcul du Bbio dans la nouvelle RE2020 est plus exigeant et intègre beaucoup mieux les besoins de rafraîchissement

Innovation FlowCast



du bâtiment en été. Pour les programmes de logement livrés en héritage, la SOLIDEO a ainsi imposé un objectif de performance similaire mais qui correspond à un objectif de Bbio ≤ Bbio max -20% selon la RE2020.

Le Bbio est un indicateur complet car il permet de mesurer la qualité de la conception bioclimatique (surface vitrée, exposition, compacité du projet), la performance de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'optimisation de l'éclairage naturel.

Sur le Village des Athlètes, les bâtiments tertiaires atteignent majoritairement les objectifs de Bbio ≤ Bbio max -35%, avec des résultats qui varient de -37% à -40% hormis :

- un plot qui s'approche fortement de l'objectif avec -34%, on note néanmoins une étanchéité à l'air défavorable prise en compte dans l'étude thermique par rapport à l'étanchéité mesurée sur la bâtiment ;
- un bâtiment affichant un gain de -9% sur le Bbio, dont les résultats sont en cours d'analyse. Cela s'explique en partie par l'intégration en façade de modules de traitement de l'air pour chacune des menuiseries, facilitant ainsi la modulation des surfaces de bureau pour la vie future du bâtiment. Le nombre important de ces équipements crée des déperditions thermiques dues à la dégradation ponctuelle de l'isolation.

Sur la partie résidentielle, tous les bâtiments atteignent Bbio ≤ Bbio max -40%, à l'exception d'une résidence étudiante (-35%). 58% des bâtiments atteignent même Bbio ≤ Bbio max -50%, et un bâtiment atteint Bbio ≤ Bbio max -68%, ce qui est exceptionnel, en particulier du fait de son orientation Sud-Ouest sans masques lointains qui limite les besoins en chaud et en éclairage.

La SOLIDEO a souhaité comprendre quels étaient les principaux facteurs de réussite de

l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments du Village des Athlètes. Elle a pour cela réalisé une étude avec son AMO qui a démontré l'effet de plusieurs paramètres sur les déperditions thermiques :

- le facteur de compacité des bâtiments influe beaucoup. En prenant l'exemple d'un des bâtiments du village dont le facteur de compacité est 0,76, on obtient un gain sur les déperditions de façade de 33% par rapport au même bâtiment dont l'animation des façades serait plus prononcée et le facteur de compacité à 1,21 ;
- le choix de mettre en œuvre une quantité d'isolant plus importante permet aux bâtiments d'être moins énergivores et optimise leurs performances thermiques. En effet, l'emploi d'isolants plus épais (de 60% environ) et jusqu'à 200 mm d'épaisseur permet une réduction importante des déperditions au niveau de l'enveloppe du bâtiment, de l'ordre de 8 à 10% par rapport à un projet RT2012 classique ;
- le choix de mettre en œuvre une isolation thermique par l'extérieur ou répartie permet d'optimiser considérablement les déperditions par rapport à une isolation thermique par l'intérieur de par le traitement des ponts thermiques, en particulier au niveau des planchers intermédiaires.

C'est également l'ensemble de ces leviers qui a été activé pour les groupes scolaires. Les écoles du Bourget qui ont été construites selon les principes de la labellisation Passivhaus, et donc les plus exigeants en termes de conception bioclimatique, isolation et étanchéité à l'air, atteignent un gain sur le Bbio max de 61% pour un bâtiment et 64% pour l'autre. Le groupe scolaire de Saint-Ouen, qui a aussi activé ces leviers dans une moindre mesure, atteint un bon résultat de -39% par rapport au Bbio max.

Résultats de performance énergétique des ouvrages

	Résultats
Stade Yves du Manoir	Bâtiment A : E3 atteint, Cep - 52% Bâtiment B : E3 atteint, Cep - 40%
Arena Porte de la Chapelle	Gymnases : E3 atteint, Cep - 34%
Gymnase du Bourget	E3 Atteint, Cep - 41%
Groupe scolaire de Saint-Ouen	E3 atteint, Cep - 60%
Ecoles du Bourget	Bâtiment A : E3 atteint, Cep - 68% Bâtiment B : E3 atteint, Cep - 69%

La conception bioclimatique des ouvrages olympiques jouant non seulement sur les besoins énergétiques mais également sur le confort, d'autres facteurs d'amélioration sont détaillés dans la partie confort de ce rapport (Voir page 108).

c. Utiliser des équipements performants

La SOLIDEO a également utilisé un autre indicateur de la réglementation RT2012 pour mesurer la performance énergétique des constructions : le Cep. Ce coefficient représente la consommation conventionnelle d'énergie primaire du projet, portant sur les consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et d'auxiliaires (pompes et ventilateurs). Cette exigence impose, en plus de l'optimisation du bâti exprimée par le Bbio, le recours à des équipements énergétiques performants, à haut rendement.

La SOLIDEO a imposé des objectifs ambitieux concernant l'atteinte du Cep en généralisant sur la plupart des bâtiments notamment les groupes scolaires, les gymnases, etc. l'atteinte de $Cep \leq Cep_{max} - 30\%$ selon la RT2012. Le niveau E3 du label E+C- est également demandé. Les ouvrages ont tous atteint les niveaux attendus, quelques-uns sont présentés ci-dessous.

Pour le Village des Athlètes, le niveau E3 du label E+C- est exigé pour les logements et le niveau E2 pour les bureaux. En plus de ces objectifs globaux de performance énergétique, la SOLIDEO a souhaité aller plus loin en imposant des limites sur des besoins énergétiques spécifiques :

- 25kWh/m².an pour les besoins de chauffage dans les logements et 15 kWh.m².an dans les bureaux ;

- 20kWh/m².an pour les besoins liés à la production d'eau chaude sanitaire dans les logements.

Sur l'ensemble des secteurs du Village des Athlètes, ces résultats sont atteints à la fois sur le niveau E3 et E2 et également sur les besoins énergétiques.

Pour atteindre les niveaux imposés, en complément de la conception bioclimatique, les équipes de conception sur les ouvrages ont favorisé la mise en œuvre de systèmes énergétiques performants et des installations de production d'énergie renouvelables :

- concernant le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire : isolation des réseaux de distribution en classe 4 minimum, systèmes

de régulation performants, généralisation des pompes à chaleur ou des échangeurs avec les réseaux de chaleur ;

- ventilation : centrale en double-flux avec récupération d'énergie sur les équipements publics, centrale double-flux adiabatique pour les bureaux, régulation par détection de présence ou sonde, réseaux aéraulique en classe B minimum ;
- éclairage : systèmes LED, détecteurs de présence ;
- pilotage : généralisation des GTB dans les équipements publics et les bureaux permettant le suivi des performances énergétiques réelles, l'anticipation des opérations de maintenance, l'intervention à distance et l'adaptation en continu des performances en fonction des conditions réelles (occupation, météo, etc.).



Un projet innovant de gestion énergétique d'un immeuble tertiaire sur le secteur E du Village des Athlètes

Le groupement mené par Nexity et Eiffage Immobilier, lauréat du secteur E du Village des Athlètes, met en œuvre sur l'un des bâtiments tertiaires en phase héritage un projet innovant de gestion énergétique d'un immeuble tertiaire qui accueillera un parc de stationnement et des bureaux en phase héritage.

Le bâtiment est équipé de panneaux photovoltaïques en toiture et de bornes de recharge pour véhicules électriques de type V2G (Vehicule-To-Grid) permettant d'utiliser les véhicules électriques comme moyen de stockage et de réinjection de l'électricité.

Les bornes bidirectionnelles permettent de contrôler la charge et la décharge des véhicules électriques. Différents types de services sont alors possibles afin d'apporter de la flexibilité au système électrique.

Un système de pilotage permet d'ajuster en temps réel les besoins en électricité et les ressources du bâtiment pour décarboner l'électricité consommée, limiter les appels de puissance, et répondre à d'éventuelles contraintes tarifaires ou environnementales.

C'est la combinaison de solutions techniques pionnières - systèmes de charge réseau/ véhicules électriques bidirectionnels, autoconsom-

mation de la production photovoltaïque, utilisation de batteries - et leur pilotage qui permet d'innover à travers une Garantie de Puissance Optimisée, avec un objectif de gain énergétique global de 12%.

Cette innovation fait l'objet d'une dotation du Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO.



Le bâtiment de bureaux E3 du VOP

d. Les rénovations énergétiques des sites sportifs et piscines

La plupart des équipements sportifs du programme de la SOLIDEO datent des années 1970 et affichaient des consommations énergétiques très élevées. La rénovation de ces bâtiments a impliqué de trouver un équilibre entre les contraintes techniques liées à l'existant, la réduction des besoins énergétiques, la fonctionnalité et le confort à l'horizon du changement climatique.

En amont de chaque projet, un audit énergétique a été réalisé. L'ensemble des données de consommation de l'ouvrage existant ont été étudiées : besoins de chaud et de rafraîchissement, consommations liées à la production d'eau chaude sanitaire, à la ventilation et à l'éclairage. L'état de l'enveloppe et des menuiseries ainsi que l'état de tous les équipements techniques des réseaux, du chauffage, de la ventilation ont été expertisés. Les conclusions de l'audit ont alors identifié plusieurs bouquets de travaux permettant une amélioration de la performance énergétique du bâtiment.

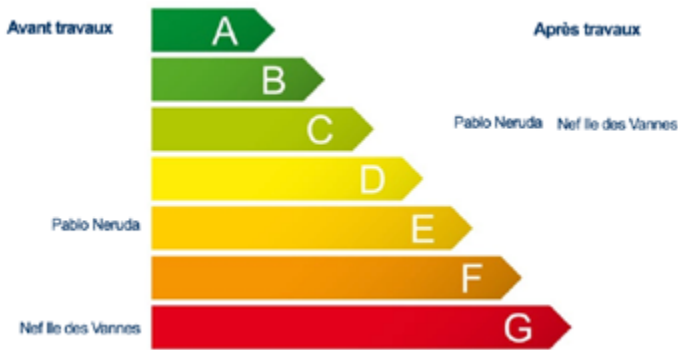
Ces travaux pouvaient concerner :

- l'amélioration des performances de l'enveloppe : en mettant en place une isolation sur les façades et/ou sur les toitures, en remplaçant les menuiseries par du double-vitrage notamment ;
- l'optimisation des installations de ventilation : par l'installation de centrales de traitement de l'air double-flux à récupération d'énergie par exemple ;
- le changement des équipements pour des modèles moins énergivores et la réfection des réseaux : chaudières, radiateurs, éclairage en Led avec détecteur de présence, etc.

Pour quelques ouvrages, les travaux de rénovation choisis correspondaient exactement aux bouquets présentés dans les études. On dispose alors d'une évaluation des consommations énergétiques post-travaux, ce qui permet donc d'estimer de manière fiable le gain énergétique apporté par la rénovation.

C'est notamment le cas de la rénovation de la Grande Nef de l'Île des Vannes qui permet 78% de gain énergétique et la rénovation du gymnase Pablo Neruda qui permet un gain de 55%.

L'étiquette de diagnostic de performance énergétique présentée ci-dessous illustre l'amélioration apportée par les travaux de rénovation : la Nef de l'Île des Vannes passe de G à C et le gymnase Pablo Neruda passe de E à C.



Plusieurs autres maîtres d'ouvrages ont intégré à leur programmation les préconisations de l'audit mais n'ont malheureusement pas réalisé d'études pour en évaluer les effets. On ne dispose donc pas pour ces ouvrages d'estimations fiables de gains énergétiques. Il s'agit là d'un retour d'expérience important pour la SOLIDEO : la mise à jour des études de performance énergétique en phase réception devrait toujours être inscrite dans les marchés de maîtrise d'œuvre. Aujourd'hui, c'est assez peu fréquent alors que de nombreuses modifications de projets ont eu lieu et ont apporté des modifications substantielles.

Pour dépasser cette difficulté, la SOLIDEO et les maîtres d'ouvrage se sont engagés à réaliser un suivi fin des consommations énergétiques pendant les deux premières années d'exploitation après rénovation. L'analyse des consommations réelles permettra donc de faire un bilan sur la performance des travaux de rénovation.

Concernant les piscines, la SOLIDEO avait fixé des objectifs de consommation pour les constructions neuves. Ces objectifs sont souvent plus difficiles, voire impossibles, à atteindre pour les piscines en rénovation en fonction de la performance de l'équipement à l'origine, des choix de rénovation, de la qualité de l'enveloppe, etc. Il a donc été donné comme objectif de s'en rapprocher et d'apporter un gain de consommation significatif par rapport à l'existant. Pour cela, la même méthode est appliquée : réalisation d'un audit énergétique

et choix du bouquet de travaux apportant le meilleur compromis investissement, gain énergétique, amélioration du confort.

La rénovation des piscines permet des gains énergétiques compris entre 13 et 20%. Seule la

piscine de Colombes voit ses consommations par bassin augmenter à cause de la réalisation de l'extension à l'extérieur comprenant un bassin nordique, beaucoup plus énergivore, ainsi qu'une zone ludique (pataugeoire et toboggans).

Résultats des rénovations énergétiques de piscines

	Performance énergétique des piscines rénovées			
	Bertrand Dauvin	Maurice Thorez	Colombes	Georges Vallerey
Nature de la rénovation	Rénovation des systèmes énergétiques et de l'éclairage	Rénovation des systèmes et remplacement de la voute	Rénovation complète de la structure et des équipements Nouvelle zone extérieure avec bassin nordique et toboggans	Rénovation des systèmes et changement de la toiture
Consommation énergétiques totales avant-projet En kWhEF/m²bassin.an	5 081	3 209	2 986	4 201
Consommation énergétiques totales après projet En kWhEF/m² bassin.an	4 062	2 806	3 740	3 481
Gain apporté par la rénovation	- 20 %	- 13 %	25 %	- 17 %

2. Développer les approvisionnements en énergie bas-carbone

Indissociable des objectifs de performance et de sobriété énergétique, car les moyens de production d'énergie renouvelable sont en général coûteux à l'investissement et disponibles en quantité limitée, l'approvisionnement en énergie renouvelable et de récupération, de préférence locale pour en maîtriser la disponibilité et le coût à long terme, est un levier majeur de décarbonation et de résilience d'une ville, d'un quartier ou d'un équipement.

Lors des phases de conception de tous les ouvrages olympiques, différents scénarios d'approvisionnement en énergie ont été étudiés à la fois pour répondre aux besoins de chaud et froid du bâtiment mais également

pour les besoins en électricité. Ces études prenaient en compte les infrastructures et les ressources locales existantes et notamment la présence de réseaux de chaleur, le potentiel géothermique, l'existence de filières de biomasse et le potentiel de l'énergie solaire. En fonction des besoins du bâtiment ou du projet urbain, la SOLIDEO a cherché à retenir le système le plus pertinent au regard des critères économiques (investissement initial, frais d'exploitation), d'usage et environnementaux. Afin de tenir les objectifs carbone globaux, la SOLIDEO avait fixé plusieurs types d'objectifs, en imposant notamment un taux minimal d'énergies renouvelables et de récupération (ENR&R).

e. Les réseaux d'énergie : source privilégiée

Création de réseaux de géothermie sur les villages

Les réseaux de chaleur, et de froid le cas échéant, permettent de maîtriser le contenu en CO₂eq de l'énergie utilisée pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement des bureaux et logements. Les deux Villages parviennent à un taux d'énergies renouvelables proche de 70% grâce à l'extension ou la création d'un réseau d'énergie alimenté par des énergies renouvelables réalisées par la SOLIDEO en partenariat avec les collectivités compétentes (SMIREC et EPT Paris Terres d'Envol) et leurs délégataires.

La solution technique retenue pour le réseau d'énergie de la ZAC du VOP repose sur la géothermie à faible profondeur. Cette technologie exploite la chaleur naturelle de la nappe de l'Yprésien. Cette solution permet aux bâtiments de logements et bâtiments tertiaires de bénéficier de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de froid avec une énergie à 65% renouvelable. La chaleur et le froid sont apportés à chaque logement grâce à un système de plancher rayonnant, c'est-à-dire un réseau circulant en serpentin dans les dalles des logements et permettant de faire circuler de l'eau chaude en hiver et froide en été. Ce service mis en place à l'échelle d'un quartier

de logements constitue une innovation majeure participant ainsi au confort thermique à l'horizon 2050 (voir page 111).

La chaleur provient de nappes d'eau chaude présentes naturellement dans le sous-sol. L'eau géothermale est puisée entre 50 et 70 mètres de profondeur dans la nappe à une température de 14°C. Pour amener l'énergie en surface, l'eau chaude souterraine doit être extraite au moyen de plusieurs puits de captage. Les installations géothermiques sont constituées de 3 puits « producteurs » qui extraient l'eau de la nappe. L'eau puisée est ensuite acheminée vers une centrale géothermique permettant de produire la chaleur ou le rafraîchissement nécessaire aux besoins de fonctionnement des bâtiments. L'eau géothermale est ensuite réinjectée dans la nappe via un réseau de 8 puits « injecteurs ».

À l'intérieur de chaque copropriété est réalisée une sous-station avec des échangeurs chaud et froid permettant à la copropriété d'alimenter son ou ses bâtiments.

La réalisation de ce réseau a impliqué un travail en collaboration avec de multiples parties prenantes : le SMIREC et son délégataire Plaine Commune Energie, la ville de Saint-Ouen, l'ensemble des opérateurs immobiliers afin de mesurer leurs besoins, l'ADEME et la Région Ile-de-France qui ont apporté une subvention dans le cadre du Fonds Chaleur.

La SOLIDEO a assuré le rôle de coordinateur général de l'ensemble des acteurs impliqués afin de garantir une cohérence dans les plannings de réalisation des différentes phases de réalisation du réseau, la signature des conventions et polices d'abonnement et la mise en service du réseau d'énergie. Elle a réalisé dans le cadre de la ZAC du Village Olympique et Paralympique les réseaux internes à la ZAC, les sous-stations et les raccordements à Saint-Ouen, ainsi que le génie civil de la centrale géothermique.

Le titre V, document rédigé par l'Etat qui valide les performances du réseau, a été obtenu et permet de valider le contenu en carbone très faible du réseau.

Caractéristiques environnementales du réseau du Village

	Contenu carbone (kgCO ₂ eq/kWh)	Taux ENR&R
Réseau de chaleur	0,041	65 %
Réseau de froid	0,032	-

Afin de confirmer le gain carbone associé au réseau de chaleur et de froid, la SOLIDEO a fait réaliser une étude sur un échantillon de 13 bâtiments du village avec pour données de base leurs consommations énergétiques en phase réception.

Ainsi, à performance énergétique du bâtiment constante, la mise à disposition d'un réseau de chaleur performant associée à l'obligation de raccordement des lots immobiliers a permis une réduction de l'impact des consommations énergétiques de 29% par rapport au réseau de chaleur existant et de 56% par rapport à un raccordement au réseau de gaz. A l'échelle des 13 bâtiments pris en compte dans l'étude, cela représente 15 300 tCO₂eq économisées. Ce chiffre est à mettre en perspective par rapport à l'impact carbone de la construction du réseau de chaleur, évaluée à 500 tCO₂eq (hors installation de production déjà comptabilisée

de manière théorique et forfaitaire dans l'ACV des bâtiments). Le bilan de cette étude montre que la construction d'un réseau de chaleur performant à l'échelle d'une opération d'aménagement représente un gisement très important d'économie de carbone.

Raccordement à des réseaux existants

Partout où des réseaux de chaleur existaient déjà, les ouvrages olympiques y sont raccordés. Les réseaux présentent des avantages certains : un coût de l'énergie stable, une énergie produite localement et bien moins émissive en termes de carbone.

Les 3 piscines construites dans le programme de la SOLIDEO ont été raccordées à des réseaux locaux à forte teneur en énergies renouvelables à Saint-Denis, La Courneuve et Aubervilliers. Des projets de création de réseau ou d'extension consécutifs à la réalisation des ouvrages olympiques sont également en cours sur d'autres communes. Le Gymnase du Bourget sera ainsi raccordé au réseau créé par la SOLIDEO sur la ZAC du Cluster des Médias, la Piscine de Colombes envisage l'usage de la géothermie.

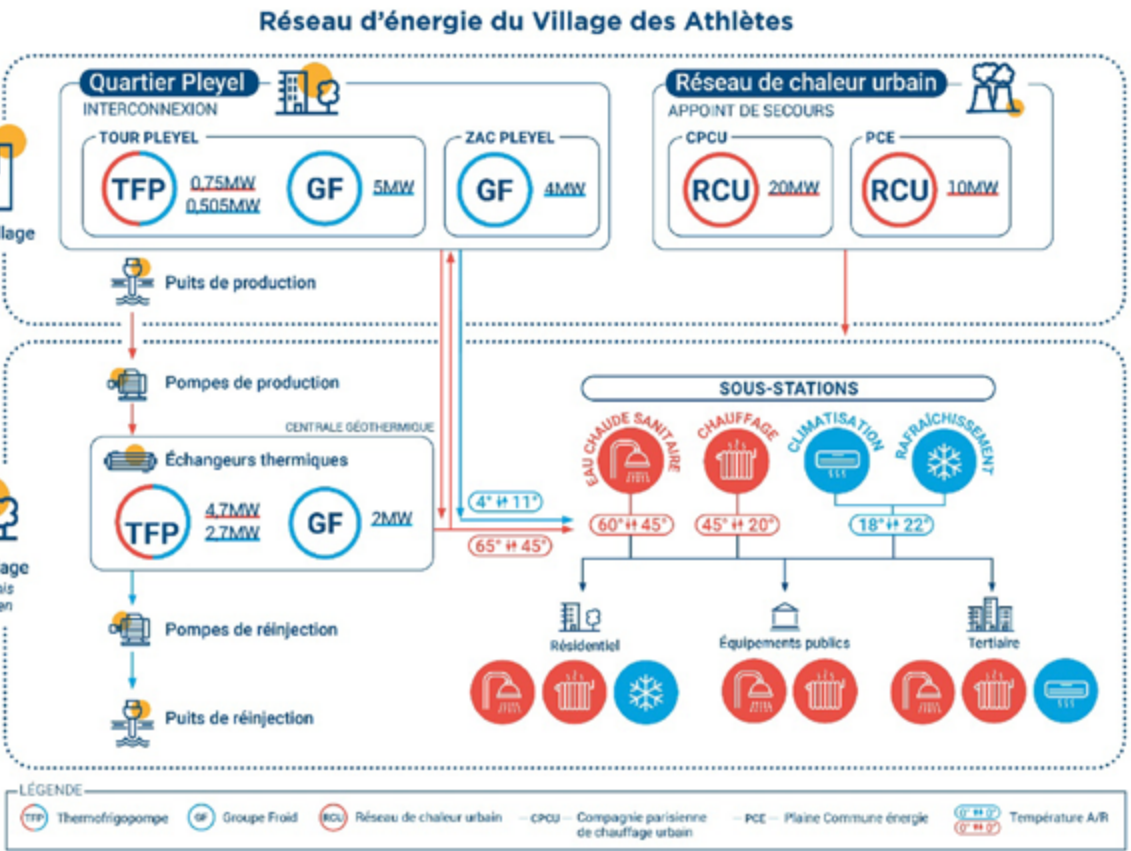
Ouvrages raccordés à des réseaux de chaleur existants

Centre Aquatique Olympique	Réseau de chaleur à 80% ENR
Piscine d'Aubervilliers	Réseau de chaleur à 65%ENR
Piscine de Marville	Réseau de chaleur à 80% ENR

Les travaux de rénovation du Stade de France et de l'Arena de Bercy ont permis leur approvisionnement en énergie par des sources d'énergie à plus faible impact carbone : ainsi le Stade de France qui fonctionnait lors des grands événements sur des groupes électrogènes a été raccordé à l'électricité, et l'Arena de Bercy a été raccordée au réseau Fraicheur de Paris.

Gains carbone associés au changement de source énergétique

	Changement de source énergétique	
	Stade de France	Arena de Bercy
Avant travaux	Utilisation de groupes électrogènes au fioul en fonctionnement standard	Production de froid assurée par refroidissement électrique
Après travaux	Raccordement au réseau électrique, groupes électrogènes réservés pour le mode secours	Raccordement au réseau de froid urbain de la Ville de Paris
Gain carbone permis tCO ₂ eq/an	77	180



f. La récupération de chaleur

Les systèmes de récupérations d'énergie sont des dispositifs conçus pour récupérer et réutiliser de l'énergie qui serait autrement perdue ou gaspillée. Ces systèmes contribuent à réduire la consommation d'énergie, les coûts opérationnels et l'empreinte environnementale liée à l'exploitation d'un bâtiment, tout en améliorant l'efficacité énergétique globale.

Les principaux ouvrages faisant appel à la récupération de chaleur fatale sont les piscines. Elles utilisent notamment des systèmes permettant le captage de chaleur sur les eaux grises, les eaux de fuite des bassins et pédiluves ou la récupération de chaleur fatale des déshumidificateurs.

Dispositifs de récupération de chaleur sur les piscines

Piscines	Systèmes de récupération
Piscine de Marville	- la récupération de chaleur dans l'eau des douches grâce à un dispositif de type Gaïa Green (la récupération de chaleur au niveau des douches collectives du RdC permet d'économiser environ 20% des besoins totaux) - la récupération des calories dans la bache de récupération : un récupérateur de calories permet de récupérer une partie des calories présentes dans l'eau chauffée de la bache de récupération pour préchauffer l'eau froide sanitaire alimentant les appoints des bassins intérieurs
Piscine d'Aubervilliers	- Le froid récupéré est utilisé pour la déshumidification de l'air - Récupération de chaleur sur les eaux usées des douches d'efficacité 20% pour la préparation de l'ECS - Récupération de chaleur sur les eaux de fuite d'efficacité 30% pour le chauffage de l'eau des bassins - Récupération de chaleur sur l'eau des pédiluves d'efficacité 30% pour le chauffage de l'eau des bassins
Piscine Maurice Thorez	- L'installation d'un système ONSEN de récupération passive des eaux de déconcentration - Récupération sur eaux grises ECS, la récupération sur eaux de déconcentration - Récupération sur déshumidification thermodynamique



Le Centre Aquatique Olympique est l'ouvrage qui a le plus poussé cette logique de récupération de chaleur. En effet, les piscines sont des équipements très gourmands en chaleur : un tiers des besoins énergétiques du CAO est liée à la production de chaud après déduction des dispositifs de récupération de chaleur. Sur le CAO, la distribution de chaleur est réalisée par l'intermédiaire de deux

boucles : l'utilisation en priorité d'une boucle dite « basse température 45°C/35°C - » sur laquelle sont raccordés les dispositifs de récupération et l'utilisation en complément de la seconde boucle dite « haute température 70°C/45°C » raccordée au réseau de chaleur urbain. Quatre dispositifs de récupération sont raccordés sur cette boucle basse température :

Dispositifs de récupération de chaleur du CAO

Dispositif de récupération	Energie récupérée	Principe de fonctionnement
Groupes frigorifiques de déshumidification	321 MWh/an 7% des besoins de chaleur	Ces groupes permettent de déshumidifier l'air par refroidissement avec récupération de chaleur.
Terraotherm	570 MWh/an 12% des besoins de chaleur	Le dispositif Terraotherm réalise le stripage des bacs tampons (process d'extraction des trichloramines pour être rejetées à l'extérieur) en condensant l'air extrait dans de l'eau. Pour cela, il produit du froid et rejette de la chaleur.
Chaudières numériques	829 MWh/an 18% des besoins de chaleur	Situé à proximité du CAO, un centre spécialisé dans l'exploitation de données fournira 110kW de chaleur. En effet, ce centre est composé de serveurs informatiques dont on recycle la chaleur pour chauffer des bâtiments.
Eaux grises	69 MWh/an 1,5% des besoins de chaleur	Les eaux issues des douches (37°C) ainsi que celles issues des pédiluves seront dirigées sur des échangeurs tubulaires fonctionnant à contrecourant pour permettre de réchauffer l'eau froide à partir des eaux usées.

L'ensemble de ces dispositifs contribue à réduire de 38% la consommation d'énergie grâce à la récupération de la chaleur fatale. La récupération de chaleur sur les eaux des douches a également été généralisé sur d'autres ouvrages que les piscines : le Stade Yves du Manoir, la résidence étudiante et le bâtiment Cycle du Village des Athlètes par exemple.

Le centre aquatique d'Aulnay-sous-bois valorise les calories du réseau des eaux usées de la ville. Les eaux usées circulant à une température minimale de 13°C dans les

canalisations à proximité de la piscine, une centrale équipée de pompes à chaleur permet de transmettre ces calories pour préchauffer l'eau des bassins et l'eau chaude sanitaire de la piscine. Ce système permet une production de 7 500MWh par an ce qui représente 85% des besoins en chaleur de l'ouvrage.

Enfin, la Ville de Paris a développé au sein de l'Arena de la Porte de la Chapelle un système énergétique à l'échelle du quartier alliant énergies renouvelables et de récupération permettant d'atteindre le 100% ENR&R pour le bâtiment.



Un projet d'approvisionnement 100% ENR&R sur l'Arena Porte de la Chapelle

L'Arena Porte de la Chapelle présente un projet d'approvisionnement conçu pour atteindre 100% ENR&R au bout de 10 ans et la création d'une « pile verte urbaine » qui alimentera le Nord parisien. Cette innovation est financée par le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO.

Une usine de production de froid pour l'ensemble du quartier, implantée dans l'Arena, produit 100% des besoins en froid de l'Arena et sera en partie alimentée par des panneaux solaires photovoltaïques en toiture. La récupération de la chaleur fatale de cette installation (récupération thermique et pompe à chaleur) permettra à terme de couvrir l'intégralité des besoins en chaleur de l'Arena.

La production de chaleur est ainsi assurée en priorité par la récupération de l'énergie fatale du réseau de froid Fraîcheur de Paris. Cette récupération permet de couvrir dès-à-présent 50% des consommations de chaleur de l'Arena. Le complément est assuré par un raccordement au réseau de chauffage urbain CPCU. Au fur et à mesure du développement du réseau de froid de la Porte de la Chapelle, la récupération de chaleur fatale, associée à une pompe à chaleur, devrait suffire à couvrir l'intégralité des besoins de chauffage et d'ECS.

Ainsi, le mix énergétique et son taux d'ENR&R évoluent au fil des ans du fait de l'augmentation de la chaleur fatale récupérable sur le réseau de froid urbain. Il est estimé à 92% pour la première année d'exploitation et à 100% à un horizon de 10 ans. Par ailleurs, une partie de la surface de la toiture est mise à disposition du Délégitaire de la Concession de Froid Urbain pour y implanter une centrale photovoltaïque (1850 m² de panneaux).

Ces performances peuvent être atteintes en raison de la sobriété énergétique du bâtiment. La conception de l'Arena s'est ainsi attachée à réduire les besoins de chaleur et de froid tout en favorisant les gains passifs, notamment en recherchant le meilleur compromis sur la compacité, l'inertie et la ventilation naturelle, ainsi que par une enveloppe présentant un haut niveau d'étanchéité à l'air, des protections solaires fixes.

Si une partie des installations techniques a déjà été réceptionnée avec le bâtiment début 2024, l'innovation prendra tout son sens avec le raccordement aux réseaux de chaleur et de froid prévu en 2026.

Production électrique par les toitures photovoltaïques

L'ambition énergétique de la SOLIDEO en matière d'électricité renouvelable se traduit par le déploiement de dispositifs de production solaires photovoltaïques sur les ouvrages. Au Village des Athlètes, des installations photovoltaïques ont été réalisées pour l'ensemble des secteurs immobiliers avec l'objectif commun de couvrir 20 % des consommations électriques tout usage. Les choix d'implantation des installations sur les toitures a répondu à des critères économiques, et également à la volonté de la SOLIDEO de diversifier les usages sur les toitures en fonction de leur altitude et de leur localisation :

- la végétalisation de toitures non-accessibles, afin de contribuer à l'abatement des eaux pluviales, à la préservation et au renforcement

de la biodiversité et enfin à la lutte contre l'effet d'îlot de chaleur urbain ;

- la mise en œuvre de terrasses partagées pour les occupants ;
- la mise en place de toitures photovoltaïques.

Sur la ZAC du VOP, l'ensemble des panneaux photovoltaïques représente une production de 1160 MWh par an soit l'équivalent de 494 ménages complètement couverts en énergie. Cette production est plus basse qu'initialement projeté en phase de conception à cause de plusieurs facteurs :

- la surface dédiée aux panneaux a parfois été réduite car l'espace nécessaire aux cheminements et installations techniques de toitures avait été sous-estimé ;
- le mode de fixation et le modèle des panneaux a également évolué au cours de la phase de réalisation.

Un secteur du Village prévoit en plus une production photovoltaïque déportée sur un autre site, qui sera mis en œuvre en phase héritage. Quelques bâtiments du Village des Athlètes ainsi que la centrale de mobilité sur L'Ile-Saint-Denis seront équipés en panneaux après les Jeux, les données de production seront donc consolidées ultérieurement.

Sur le Village des Athlètes, la SOLIDEO a pris le parti de ne pas prescrire un type de montage des projets. Il en résulte une diversité de choix chez les opérateurs immobiliers avec :

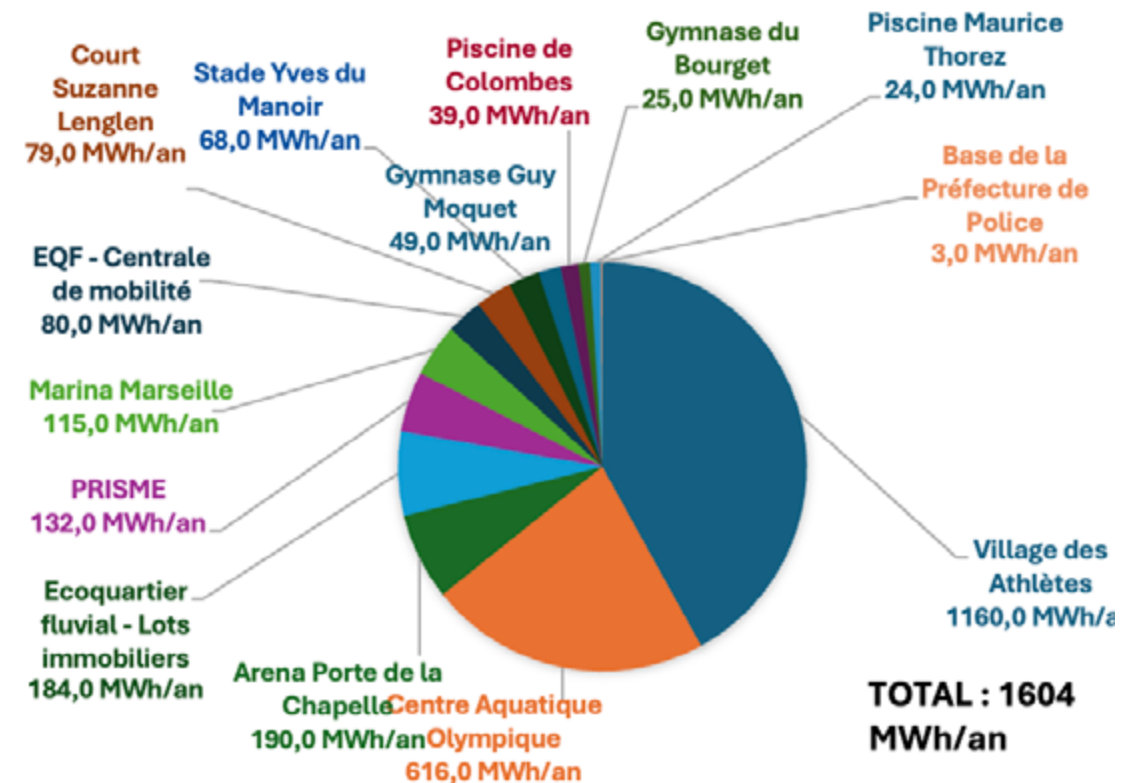
- des montages faisant intervenir un tiers investisseur opérant une revente au réseau ;
- des montages en autoconsommation individuelle ou collective avec des contrats de maintenance passés auprès d'opérateurs énergétiques mettant en œuvre les panneaux. Le secteur de l'exploitation de panneaux photovoltaïques étant assez mouvant, notamment au regard des crises énergétiques récentes, il a parfois été difficile de maintenir les montages prévus en conception. Certains investisseurs se sont désengagés car peu intéressés par des surfaces assez réduites et morcelées sur plusieurs toitures.

Production annuelle photovoltaïque des ouvrages olympiques

Le Centre Aquatique Olympique est couvert par environ 4 680 m² de panneaux photovoltaïques, pour une puissance totale de 812 kWc. Les 616 MWh par an d'électricité ainsi produites seront principalement autoconsommées par le bâtiment, ce qui en fait la plus importante centrale photovoltaïque de France sur bâtiment sportif en autoconsommation.

1 850 m² de panneaux photovoltaïques d'une puissance nominale de 234 kW, ont été installés sur le toit de l'Arena Porte de la Chapelle. La production annuelle est estimée à 190 MWh. Cette énergie servira en autoconsommation à la centrale de production de froid pour alimenter les systèmes de pompes, de filtration, ou encore l'éclairage.

Dix ouvrages supplémentaires portent des panneaux photovoltaïques en toiture : la Marina du Roucas Blanc à Marseille, le court Suzanne Lenglen du stade Roland Garros, le Stade départemental Yves du Manoir, la Piscine de Colombes, la Piscine Maurice Thorez, le Gymnase Guy Moquet, le Gymnase du Bourget, le bâtiment PRISME et enfin la base de la Préfecture de Police située en périphérie immédiate de la ZAC du VOP. Leur production photovoltaïque annuelle cumulée est de l'ordre de 614 MWh/an soit l'équivalent de la consommation de 261 ménages.



g. Des ouvrages en grandes partie alimentés en ENR&R

La conjugaison de sources d'énergies provenant de : réseaux de chaleur décarbonés, de récupération de chaleur fatale et de photovoltaïque permettent d'atteindre des taux d'approvisionnement en ENR&R très conséquents sur les ouvrages.

Sur l'Arena de la Porte de la Chapelle, la mise en œuvre du dispositif de pile urbaine associant réseau de chaleur, centrale de production de froid, récupération de chaleur fatale et installation photovoltaïque permet d'atteindre 100% d'ENR&R en 10 ans avec la montée en puissance de l'installation.

Le Centre Aquatique Olympique, atteint lui 84% d'ENR&R grâce à l'approvisionnement énergétique par le réseau de chaleur ayant un taux d'ENR de 80%, les dispositifs de récupération et les chaudières numériques ainsi que les panneaux photovoltaïques.

En l'absence de réseaux de chaleur à proximité des ouvrages, d'autres solutions ont pu être trouvées pour maximiser le taux d'ENR&R, c'est notamment le cas sur le Stade Yves du Manoir. Dès la conception et pour atteindre les taux d'énergies renouvelables demandés, les équipes ont projeté la réalisation d'une centrale de cogénération alimentée en huile de colza. Les études ont démontré l'intérêt de cette solution à long terme en raison de l'existence de filières colza en Ile-de-France dont le potentiel énergétique est encore sous-exploité. La centrale produit simultanément de l'électricité et de la chaleur et est complétée par une chaudière au gaz pour l'appoint et le secours et l'installation de panneaux photovoltaïques. Elle permet au stade d'obtenir des taux d'approvisionnement en ENR au-delà des objectifs fixés : 56% d'ENR pour l'approvisionnement électrique de l'ouvrage et 94% d'ENR pour l'approvisionnement thermique de la zone héritage du site.

La toiture couverte de panneaux photovoltaïques du Centre Aquatique Olympique





PROMOUVOIR L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

PROMOUVOIR L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

La stratégie d'excellence environnementale de la SOLIDEO s'appuie sur l'ensemble des piliers de l'économie circulaire, c'est-à-dire : construire moins, construire mieux et en appliquant les principes de circularité à la fois pour la réalisation des ouvrages eux-mêmes, et en particulier le choix des matériaux de construction utilisés, mais également pour leurs futurs usages.

A. ECO-CONCEPTION ET CONCEPTION RÉVERSIBLE DES OUVRAGES OLYMPIQUES

La grande avancée de la SOLIDEO en matière d'économie circulaire est d'abord méthodologique et repose sur l'appropriation des principes de l'économie circulaire en phase de conception des projets. En effet, le foncier et le bâti ont été considérés comme des ressources qu'il fallait préserver, les questions de sobriété et de frugalité ont ainsi été au cœur de la définition des programmes. Et c'est aussi avec cette approche de cycle de vie du projet, qu'ont été également pensées l'évolutivité et la réversibilité des ouvrages. Ces enjeux sont centraux dans le cadre des ouvrages olympiques qui dès l'origine ont été conçus pour évoluer et répondre aux besoins distincts de deux phases : la phase jeux et la phase héritage.

1. Une candidature sobre en constructions

La sélection des sites olympiques a été réalisée lors de la phase de candidature, par le comité d'organisation. Cette sélection repose à 95% sur des sites sportifs existants ou des structures temporaires aménagées spécifiquement pour les Jeux. L'ambition de Paris 2024 était d'organiser des Jeux sobres et durables, alignés sur l'Accord de Paris et les grands enjeux environnementaux du siècle.

À cette ambition liée à l'organisation des Jeux s'ajoute également la notion d'héritage matériel pour les territoires. Les ouvrages olympiques pérennes sont avant tout pensés pour leur usage en phase héritage à destination des habitants des quartiers. Cela concerne notamment de nombreux sites sportifs d'entraînement pendant les Jeux qui seront dédiés à la pratique du sport pour la population, mais également de nombreuses infrastructures et aménagements paysagers.

Sur les 70 ouvrages que supervise la SOLIDEO, la réutilisation d'équipements existants est prépondérante avec une

majorité de rénovation de grands sites dédiés aux compétitions comme le Stade de France ou l'Arena de Bercy, mais également d'équipements sportifs du quotidien comme la Piscine Georges Vallerey construite initialement pour les Jeux de 1924. Ces rénovations visent à conserver le maximum du bâti en en améliorant les performances énergétiques, d'accueil et d'accessibilité.

Certains travaux consistent également à l'intensification des usages sur des sites existants comme sur le stade départemental Yves du Manoir qui accueille deux nouveaux bâtiments liés à la pratique sportive ou le parc départemental des sports de Marville qui accueille une nouvelle piscine et des terrains de rugby rénovés.

La sobriété foncière est également une valeur commune à l'ensemble des aménagements, comme l'illustre en particulier le Village des Athlètes qui a été construit sur des friches industrielles des communes de Saint-Denis et L'Île-Saint-Denis et en densification à Saint-

Ouen et l'Arena de la Porte de la Chapelle qui a remplacé un ancien parking. La réutilisation de fonciers ayant perdu leur usage est un des principes fort du concept de construire la ville sur la ville. Ce sont également et surtout les besoins des collectivités qui ont dicté la réalisation des constructions neuves. C'est le cas des quatre piscines construites en Seine-Saint-Denis dans le cadre d'un grand plan sur l'apprentissage de la natation dans ce département le plus pauvre de France en équipements sportifs.

Les opérations de déconstruction puis reconstruction ont été limitées au maximum et réservées pour des bâtiments obsolètes comme le Hall 3 du Parc des Expositions ou le Gymnase Guy Moquet à Aubervilliers.

La candidature de Paris marque donc une rupture avec une longue tradition associant l'accueil des Jeux avec une surabondance d'infrastructures nouvelles.



Le réemploi à grande échelle du tablier du pont du quartier des Francs-Moisins

Dans le cadre du désenclavement de certains quartiers de Saint-Denis et de l'amélioration de leur accessibilité, les abords du Canal Saint-Denis ont été réaménagés. La réalisation d'un nouveau franchissement visait à remplacer une ancienne passerelle non accessible et un pont mobile pour les voitures qui n'était plus en fonctionnement.

Pour répondre à ce défi, le projet de nouvelle passerelle a adopté une approche circulaire. Au lieu de démolir les deux ouvrages existants pour en construire un troisième, il a été décidé de réemployer le tablier de l'ancien pont mobile représentant plus de 250 tonnes d'acier. Cette démarche de réemploi, pensée de la conception à la réalisation, a permis de

maîtriser les coûts tout en offrant un ouvrage de plus grande envergure. De plus, elle a contribué à réduire l'impact environnemental global de la construction, une décision saluée pour sa durabilité et son efficacité. Il s'agit du plus grand objet réemployé dans le cadre des ouvrages olympiques.

La réalisation de cette opération complexe a comporté plusieurs étapes sensibles. Tout d'abord, il a fallu construire une barge à quelques centaines de mètres de l'emplacement final de la passerelle, avant de l'acheminer jusqu'au site. L'opération la plus délicate a été le levage du tablier du pont et son pivotement.



Déplacement du tablier de l'ancien pont

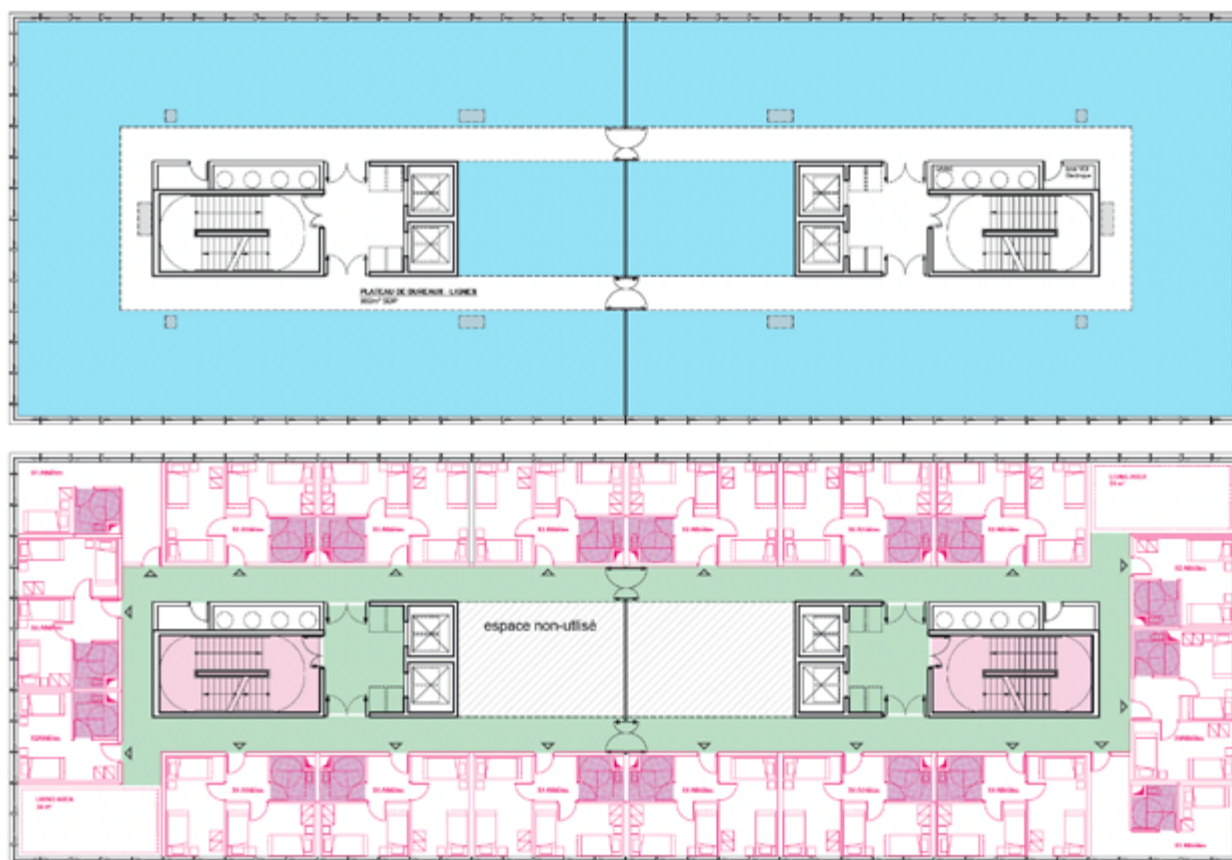
2. La réversibilité au cœur du projet du Village des Athlètes

a. Les grands principes de la conception réversible

Le Village des Athlètes, dans la mesure où il a été conçu dès l'origine pour permettre une réversibilité singulière, avec d'abord l'accueil de 14 250 athlètes et accompagnants avant de devenir un quartier de ville mixte, permet un retour d'expérience inédit et une contribution concrète pour analyser la capacité de l'architecture et des constructions à pouvoir répondre à différents temps et besoins de la ville. C'est en particulier la première fois dans l'histoire des Jeux qu'un village accueille des bâtiments de logement d'athlètes voués à devenir des bureaux.

En 2019, à la suite de l'élaboration du Plan-Guide (2018), l'équipe de maîtrise d'œuvre urbaine développe et approfondit la réversibilité du Village des Athlètes. Une étude complémentaire est élaborée pour préidentifier les contraintes et les méthodes à mettre en place pour rendre possible la réversibilité selon les différents types de programme. Un travail de spatialisation est élaboré sur plan, afin de tester la réversibilité et la capacité des différents programmes selon leurs situations urbaines. Ce travail a permis de dimensionner une capacité d'accueil des athlètes par programme et par typologie.

Bâtiment de bureau phase jeux et phase héritage



En parallèle, les discussions avec les parties prenantes ont également permis de lever un certain nombre de freins techniques et réglementaires : réglementation incendie, classement ERP, référentiel d'accessibilité. Des dérogations pour les réglementations incendie ont été obtenues pour ne pas appliquer des règles déraisonnables au regard de la durée des Jeux. Ces dérogations n'ont été acceptables que parce que les Jeux sont accueillis sur des périodes très

courtes et définies et que des dispositions d'accompagnement sont prévues (base pompiers mitoyenne du Village). Des dispositions ont également été prises en matière de fiscalité et garantie pour définir la date à partir de laquelle court les garanties décennales, l'exonération de taxe foncière, etc. Ainsi deux DAACT (Déclaration attestant l'achèvement et la conformité des travaux) sont établies à la fin des deux phases de travaux.



Le permis à double état

Le permis à double état est une innovation administrative liée au caractère exceptionnel des ouvrages olympiques. Créé par l'article 15 de la loi n° 2018-202, dite loi Olympique, le permis à double état fait partie des outils spécialement prévus en matière d'urbanisme pour faciliter l'organisation des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024.

Ce permis innovant fusionne, en une seule et même autorisation d'urbanisme, les deux états successifs des futurs ouvrages : le provisoire, destiné à accueillir les manifestations olympiques, et le définitif, dédié aux besoins des habitants. Les opérateurs immobiliers doivent ainsi anticiper l'état définitif des installations dès la conception. La loi portant évolution du logement de l'aménagement et du numérique (Elan) du 23 novembre 2018 et son décret d'application n° 2018-512 du 26 juin 2018, ont précisé les spécificités de ce permis, sans toutefois créer de régime dérogatoire autonome à proprement parler.

Cette nouveauté apporte deux avantages :

- il réduit les incertitudes en évitant de resolliciter une demande d'autorisation d'urbanisme avec les risques que cela peut présenter pour les opérateurs (recours, délais) ;
- il prévoit un délai : le projet doit être mis en œuvre dans un délai maximal de 3 ans à compter de la clôture des Jeux Paralympiques, en septembre 2024. Le bénéficiaire doit remettre les lieux en état tel que prévu dans l'état définitif.

Cela permet de sécuriser la qualité de la programmation à terme pour la collectivité et le processus de commercialisation pour les investisseurs.

12 permis de construire à double état, pour une surface totale de 330 000 m² SDP ont été déposés à l'été 2020, instruits à l'automne et obtenus entre fin 2020 et 2021 pour le Village des Athlètes. Deux correspondent à des opérations de bureaux sur près de 40 000 m² de surface de plancher.

Afin de concilier les ambitions environnementales, architecturales, constructives et programmatiques, une méthode de projet collectif, en dialogue et en co-construction a été mise en place avec les concepteurs et toutes les équipes d'études. Des ateliers de mise en commun thématiques ont été régulièrement organisés par l'équipe de maîtrise d'œuvre urbaine et la SOLIDEO (ateliers urbains, échantillons, prototypes). Ce cadre commun d'abord puis le processus de co-élaboration en dialogue ont permis d'élaborer ensemble des solutions pour concilier les contraintes complexes, auxquelles devaient répondre les projets architecturaux. Ce point est un enjeu de la réussite du projet.

Bien que les règles du jeu aient été identiques pour tous les opérateurs du village, différentes options ont été prises par les équipes de conception pour imaginer ces bâtiments à double-vie. Cependant plusieurs grands principes de réversibilité ont été adoptés :

- à l'échelle urbaine : la réduction de l'épaisseur de bâtiment, la divisibilité des grands gabarits ;

- à l'échelle du bâtiment : l'utilisation du plan libre, l'utilisation de trames génériques, la généralisation de façades non porteuses, la répartition homogène des gaines et leur surdimensionnement ;

Ainsi, le parti-pris constructif privilégie les structures poteaux-poutres planchers ou poteaux-dalles offrant un potentiel de modularité et de réversibilité important aux bureaux et logements mais également aux parkings enterrés et locaux d'activité des socles.

Des principes structurels communs, qui correspondent au plan guide réalisé par Dominique Perrault, ont été suivis sur la plupart des bâtiments du Village des Athlètes : poteaux-poutres, façades ossature bois et un noyau structurant en béton (renforçant la stabilité du bâtiment). Le plan d'étage peut ainsi se transformer en un plateau ouvert, libre et continu, avec une possibilité de réaménagement partiel ou total. Les murs de refend ont été abandonnés au profit de cloisons en SAD démontables (Séparative

d'Appartements à ossature Double) favorisant la modularité des espaces.

Il faut noter que pour plusieurs entreprises de construction, la mise en œuvre de modes constructifs poteau-poutre pour des logements, plutôt que des refends, constitue véritablement une rupture. En ce sens, le savoir-faire et la culture des entreprises est un enjeu à considérer au même niveau que les freins techniques pour leur généralisation.

La hauteur sous plafond est de 2,50 mètres pour les bâtiments résidentiels permettant à des professions libérales de s'y installer mais pas une réversibilité totale bien que l'aménagement intérieur des appartements soit flexible, sans murs porteurs. La hauteur sous plafond est sensible dans les constructions bois. En effet, le pas d'étage est augmenté à cause de planchers de 45 à 50 cm contre 30 cm pour des dalles en béton. Les bâtiments tertiaires bénéficient de hauteurs plus généreuses (une hauteur moyenne de 3,60 mètres, avec une hauteur libre de 2,70 mètres) favorisant leur adaptabilité à tout autre type de programme.

Les concepteurs ont généralement cherché à réduire l'épaisseur des bâtiments pour favoriser l'éclairage et la ventilation naturelle. Pour que les bâtiments tertiaires puissent accueillir une programmation résidentielle pendant les Jeux, la réglementation la plus contraignante, résidentielle ou tertiaire, a été appliquée permettant de satisfaire les exigences en matière d'acoustique, de thermique, de réglementation incendie et à prendre en compte la règle du C+D (empêchant la propagation du feu par les façades qui ne s'appliquent qu'aux ERP et aux immeubles d'habitation). Cette exigence a conduit à l'installation de menuiseries plus performantes et à l'accroissement de l'épaisseur des dalles pour les bâtiments tertiaires, assurant ainsi des performances acoustiques et phoniques plus importantes.

Cette démarche a aussi entraîné une évolution de la conception intérieure des bâtiments résidentiels : l'éclairage naturel des parties communes, l'aménagement en premier jour des cuisines et la possibilité de les rendre indépendantes, de même pour les salles de

bains, ainsi que des surfaces vitrées généreuses favorisant l'éclairage naturel des pièces.

Bien que le Village présente une réversibilité très ciblée, pour répondre aux besoins de deux phases prédéfinies, il est rare d'expérimenter à si grande échelle ces principes. La SOLIDEO a donc souhaité capitaliser sur les enseignements positifs et négatifs acquis tout au long du projet. Une étude a donc été publiée reprenant en détail les options prises sur un échantillon de six bâtiments du Village des Athlètes (*La réversibilité à l'épreuve du village olympique et paralympique, 6 cas d'étude*, mars 2024, disponible sur www.ouvrages-olympiques.fr).

Cette étude révèle notamment que certaines exigences de la SOLIDEO pourraient être incompatibles avec une réversibilité complète des bâtiments. En effet l'utilisation d'une structure bois rend complexe les reconfigurations de bâtiment à cause des contraintes acoustiques. Des poutres ont parfois été doublées pour éviter les transmissions acoustiques entre logements, ce qui compliquerait le réaménagement de ces espaces selon un autre plan. De même, l'utilisation d'un plancher réversible pour le chauffage et le rafraîchissement complique le redécoupage des espaces car les cheminements sont figés dans les dalles. Pour les bâtiments tertiaires, d'autres freins empêcheraient une réversibilité complète vers des logements : la trame structurelle, l'absence d'espaces extérieurs individuels, les principes de désenfumage (les équipes de conception ont choisi de ne pas classer les bâtiments en 3^{ème} famille B lors de la phase JOP pour ne pas être contraints par le désenfumage).

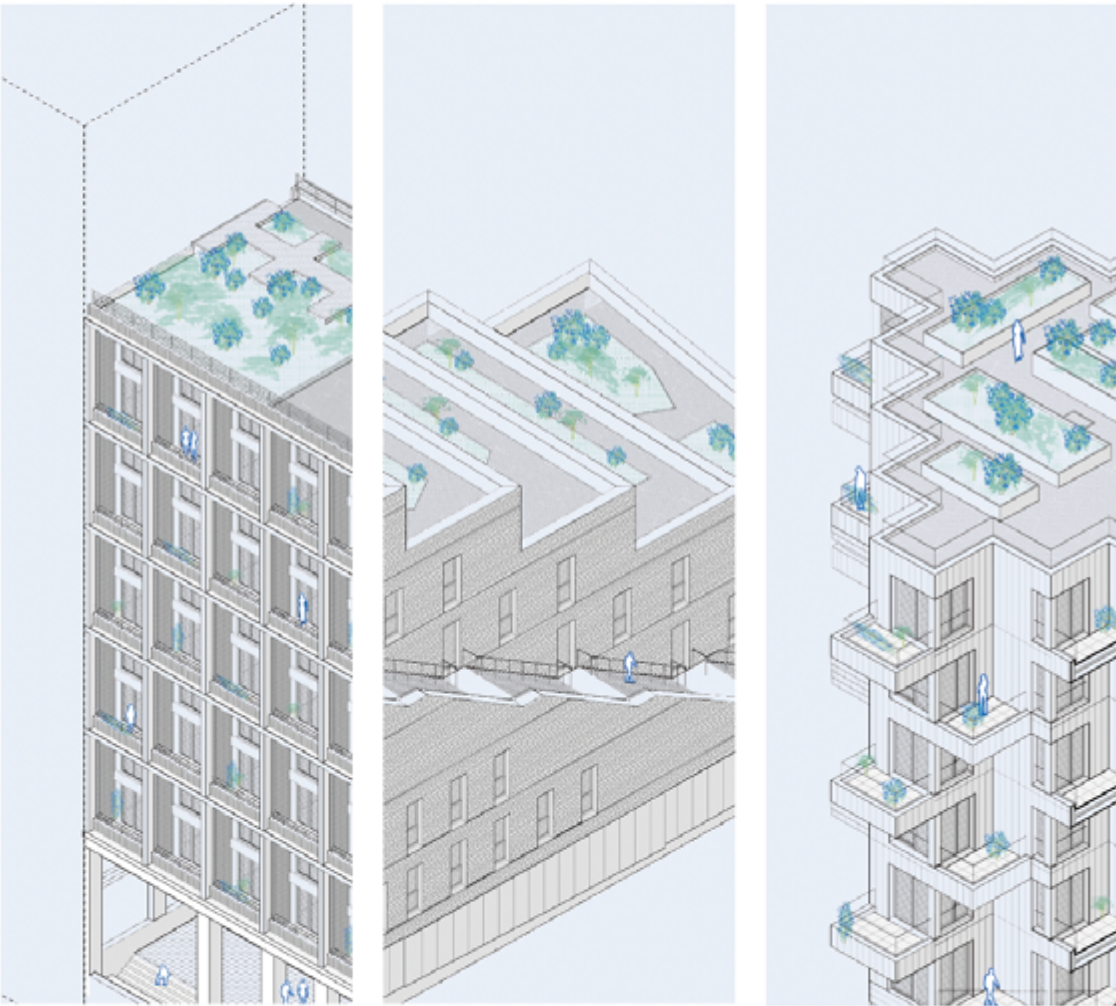
Au-delà des enjeux techniques et réglementaires, une des questions cruciales que pose la réversibilité est l'équation financière de ces projets qui génèrent des surcoûts notamment liés au surdimensionnement des installations. Cet investissement a été rendu possible grâce à l'indemnité financière versée par Paris 2024 pour prendre en compte ces coûts (indemnité de 335€/HT par m²SDP de logement et 603€/HT par m² SDP de bureaux en valeur 2024).

[Lien vers l'étude](#)

LA RÉVERSIBILITÉ À L'ÉPREUVE DU VILLAGE OLYMPIQUE ET PARALYMPIQUE

Six cas d'étude

Mars 2024

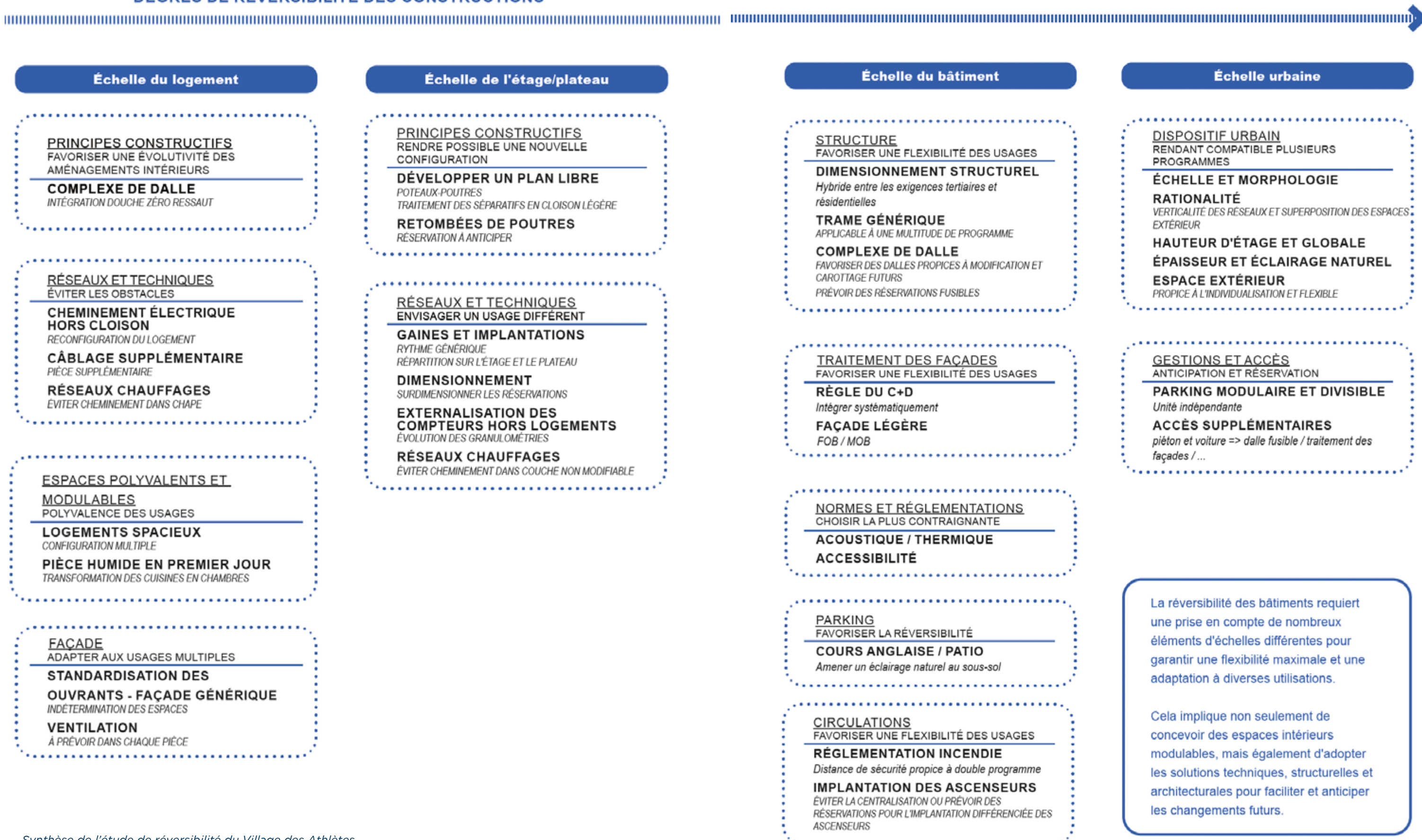


BOULEVARD
OUVRAGES
OLYMPIQUES

MG | A | U
MICHEL GUTHMANN & ASSOCIÉS
ARCHITECTURE URBANISME

UNE
FABRIQUE
DE LA VILLE

DEGRÉS DE RÉVERSIBILITÉ DES CONSTRUCTIONS



b. Opérer la réversibilité en phase chantier

Même si la conception du village s'approprie largement les concepts de réversibilité et minimise les travaux entre phase Jeux et héritage. Cette transformation implique la dépose de plusieurs éléments temporaires, en particulier salles de bain et cloisons.

La SOLIDEO a fixé un objectif de 75% de matériaux démontables et réemployables pour l'ensemble des matériaux mis en œuvre temporairement en phase Jeux. Cloisons, ascenseurs, salles-de-bains, portes, serrurerie, revêtements de sols, équipements électriques sont ainsi concernés. Plusieurs solutions sont envisagées par les opérateurs immobiliers pour anticiper leur réemploi :

- la reprise par le fournisseur : c'est le cas pour les ascenseurs, certaines moquettes. Ces solutions ont, pour la plupart, déjà été contractualisées, notamment sous la forme de contrats de location pour la moquette ;

- la reprise par l'entreprise pour ses futurs chantiers, c'est le cas de l'entreprise Paris Ouest Construction sur le lot B2R du Village des Athlètes, qui a identifié un chantier à Villemoisson en 2025 où réutiliser les éléments de plomberie et de serrurerie ;

- la recherche de nouveaux projets en Ile-de-France pouvant intégrer ces éléments de réemploi. Un catalogue des matériaux de réemploi a déjà été largement diffusé aux acteurs de la construction : maîtrise d'ouvrage, architectes, bureaux d'étude. Certains projets ont ainsi déjà commencé à réserver des matériaux du village ;

- la reprise par des artisans ou particuliers via des plateformes web ou physiques de réemploi. La mise en place d'un magasin de réemploi en rez-de-chaussée du Village est à l'étude pour écouler directement les matériaux pendant la phase de réversibilité.



LOT PLOMBERIE



WC PMR
Modèle/Marque : Porcher, Matura
Dimensions : 700mm x 355mm x 400 mm
Dates de disponibilité : fin 2024 - début 2025

QUANTITÉ : 32 u



WC PMR
Modèle/Marque : DURAVIT, Stark3
Dimensions : 700mm x 390mm x 400mm
Dates de disponibilité : fin 2024 - début 2025

QUANTITÉ : 17 u



BLOCS SALLE DE BAIN
Modèle/Marque : Boudet CESA
Dimensions : 2145 x 1250 x 2220
Dates de disponibilité : fin 2024 - début 2025

QUANTITÉ : 255 u

Catalogue de vente des matériaux de réemploi issus des JOP



Les cloisons démontables du Village des Athlètes

Les industriels et entreprises de construction se sont fortement impliqués pour trouver des solutions de réemploi des aménagements intérieurs temporaires. Les contrats de location de matériaux ou d'équipements sont très rares dans le secteur de la construction. Cependant, on observe ces dernières années une réelle demande de clients pour ces matériaux de réemploi. En effet, ceux-ci conduisent à une économie de carbone importante puisqu'ils interviennent en substitution à des matériaux neufs. Ainsi la nouvelle réglementation RE2020 permet de compter à zéro les émissions des matériaux de réemploi. Le facteur limitant réside donc pas tant sur la demande que sur la capacité technique des industriels à développer des produits et équipements facilement démontables.

La réalisation de cloisons démontables pour délimiter de façon provisoire les chambres des athlètes dans les futurs bâtiments de logement ou de bureaux a fait l'objet d'une concertation spécifique qui a rassemblé tous les acteurs de la chaîne de valeur. Pour la première fois, le groupe Saint-Gobain a ainsi conçu une cloison dont la dépose est facilitée par la mise en

place de systèmes de fixation autocollants qui n'altèrent pas les plafonds et les sols. Cette cloison à bord droit est également posée sans bande et avec vis apparente pour limiter au maximum les opérations lors du démontage. Ce produit au rendu plus provisoire qu'une cloison en plaque de plâtre classique offre cependant les mêmes qualités d'isolation thermique et phonique.

L'objectif de l'industriel était initialement de proposer ce produit innovant, mais pas forcément de s'engager sur sa seconde vie. Dans un premier temps, le groupe imaginait récupérer ces produits de réemploi non normés et de les écouler gratuitement via sa fondation. Saisissant bien l'opportunité de tester à grande échelle le réemploi, Saint-Gobain a finalement développé un protocole de requalification de ces cloisons déjà usagées qui pourront donc être réutilisées avec les mêmes garanties et ainsi revendues. Ils ont également développé une offre complète comprenant la formation des poseurs, la logistique de reprise des cloisons et la recherche de repreneurs. Cette offre a été contractualisée sur le Village des Athlètes.



Une des cloisons provisoires installée sur le VOP

3. Le Centre Aquatique Olympique : une piscine modulaire

La réversibilité jeux/héritage ne concerne pas seulement le Village des Athlètes. La capacité d'accueil du public du Centre Aquatique Olympique est plus importante en phase jeux qu'en héritage. A travers le dépôt et l'obtention d'un permis à double état, la conception de l'ouvrage prévoit cette évolution qui réduit le nombre de gradins pour créer une salle annexe dédiée à d'autres usages et la modularité du bassin.

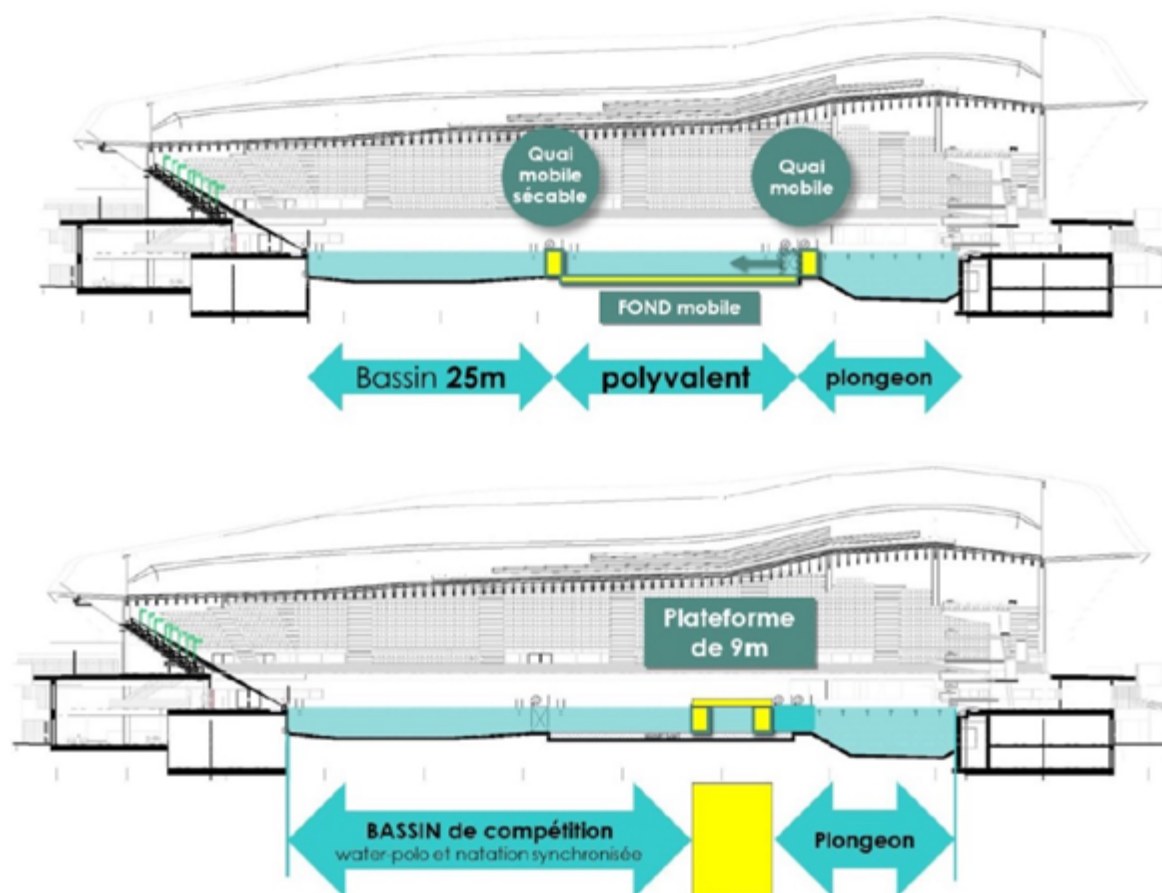
En phase jeux, des tribunes de 6 000 places ont été installées de type Arena « en fer à cheval », un bassin de 70 mètres permettant de multiples configurations de bassins, accueillant le plongeon, la natation artistique et les qualifications de water-polo.

En phase héritage, l'ouvrage est reconfiguré pour répondre aux besoins des collectivités c'est-à-dire : à la fois la pratique du sport accessible à tous, mais également l'organisation de compétitions d'envergure internationale.

Les tribunes resteront ainsi modulaires : en configuration quotidienne, la jauge est à 2500 places. Le vaste espace du deuxième niveau pourra ainsi devenir un espace d'activités sportives annexes mais restera modulable pour pouvoir permettre de nouveau l'installation de tribunes temporaires lors de compétitions de haut niveau et atteindre une jauge de 5 000 places. Cette adaptabilité est assurée par une seule cloison démontable vitrée, conçue de sorte à pouvoir être démontée plus rapidement : vitrée sur 2,10 mètres de haut, la séparation entre la halle aquatique et le plateau sportif est en construction légère de bandes verticales PVC transparentes, tendues depuis la toiture.

Le bassin est doté de deux quais mobiles et d'un fond mobile permettant une polyvalence riche d'usages. Ils permettent notamment des configurations en bassin d'apprentissage, en bassin polyvalent ou bassin de compétition.

Les configurations des bassins du CAO



B. DES MATÉRIAUX CIRCULAIRES INTÉGRÉS À LA CONCEPTION

Dans le cadre d'une construction bas-carbone, l'utilisation de matériaux issus de l'économie circulaire permet d'améliorer le bilan carbone sur plusieurs phases du cycle de vie notamment en évitant la production de déchets et en les substituant à des matériaux neufs.

1. Des objectifs novateurs sur le réemploi

Lors de la définition des objectifs pour les ouvrages en 2019, il existait très peu de retours d'expérience sur la mise en œuvre de matériaux de réemploi à grande échelle. Il n'a donc pas été facile de calibrer des objectifs qui soient à la fois ambitieux et réalisables.

Pour la plupart des ouvrages, il était demandé de déployer à grande échelle le réemploi et le recyclage en donnant quelques pistes : le réemploi de pavés ou de matériels sportifs ainsi que l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons.

Pour les bâtiments du Village des Athlètes et quelques autres projets (le Gymnase du Bourget, la base de Préfecture de Police, etc.), la SOLIDEO a souhaité aller plus loin en fixant un objectif chiffré aux opérateurs immobiliers et

aux entreprises : 10% de matériaux de réemploi pour 4 familles de produits d'aménagement intérieur et 3 familles d'aménagements extérieurs. La SOLIDEO a pris le parti de laisser le choix des produits et de ne pas fournir de matériaux de réemploi issus des démolitions afin de pousser les acteurs à mener leur propre réflexion sur le réemploi.

L'utilisation de matériaux de réemploi facilite l'atteinte d'autres objectifs comme le bilan carbone et l'obtention du label E+C-. En effet dans sa méthodologie carbone, la SOLIDEO a proposé un bilan carbone nul pour les matériaux de réemploi, reproduisant ainsi ce qui avait été mis en place par la méthodologie E+C- et aujourd'hui généralisé et pérennisé dans la réglementation en vigueur, la RE2020.

2. L'intégration de matériaux de réemploi dans les constructions neuves

a. Du réemploi en quantité pour le Village des Athlètes

Les trois opérateurs immobiliers de la ZAC du VOP ont opté pour des stratégies d'appropriation des enjeux du réemploi différentes. Certains d'entre eux se sont fait accompagner dès la phase de conception par un AMO et ont ainsi identifié des familles de produit qu'ils ont imposés ensuite à leurs entreprises générales. D'autres promoteurs se sont dessais du sujet et ont répercuté simplement l'atteinte des objectifs dans leurs contrats avec les constructeurs. La première option est clairement celle ayant apporté le plus de résultats notamment grâce à l'anticipation de tous les freins liés au réemploi.

Finalement, 730 tonnes de matériaux de réemploi ont été mis en œuvre sur le Village des Athlètes. Près d'une trentaine de produits différents ont été mis en œuvre dont les plus

importants en masse sont les faux-planchers, mur à gabion, cloisons, moquettes, et dalles gravillonnées. 55% de ces matériaux sont issus de fournisseurs de matériaux de réemploi :

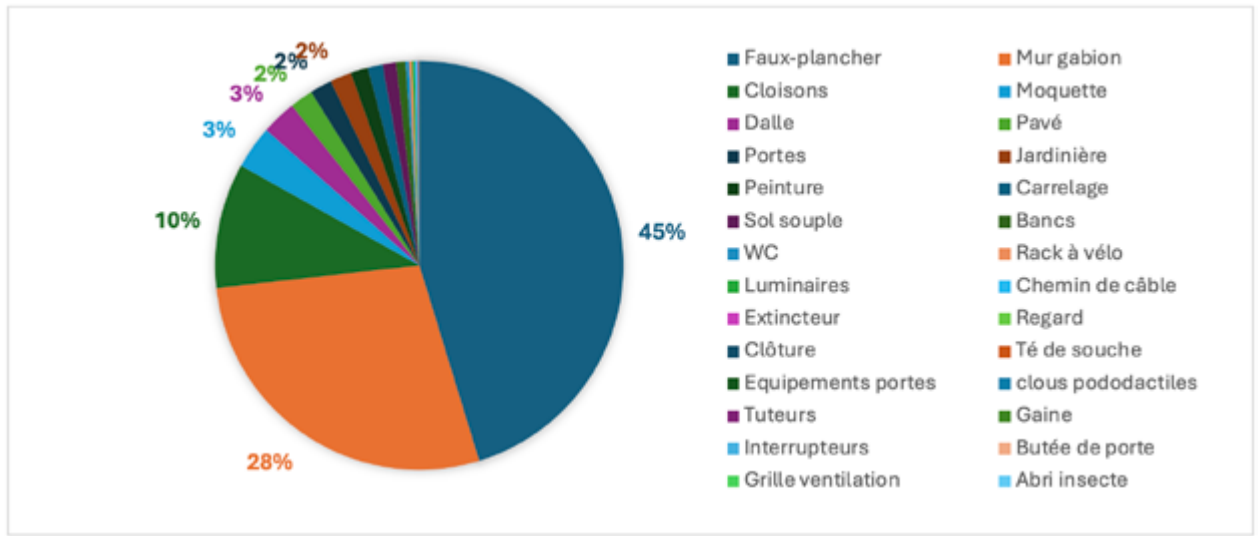
- soit des plateformes procédant à la revente de matériaux de réemploi : c'est le cas de dalles gravillonnées issus de chantiers de déconstruction et mises en vente sur ces plateformes ;
- soit directement des entreprises de déconstruction : c'est le cas d'une partie du faux-plancher fourni par l'entreprise Premys ;
- soit auprès d'industriels ou d'entreprises spécialisées dans la fabrication à partir de réemploi : l'entreprise Möbius qui récupère du faux-plancher issu de déconstruction, le remet en état et le revend ou encore l'entreprise d'insertion Réavie qui a réalisé plus de 400 mètres linéaires de jardinière à partir de bois de réemploi, ou enfin l'entreprise Textifloor qui a proposé la location de près de 10 000 m²

de moquette de réemploi pour une utilisation temporaire en phase Jeux.

Les 45% restants de matériaux de réemploi sont issus de surplus de chantier ou de fin de stock chez les industriels. Il s'agit donc ici de matériaux qui font partie de surplus de commande ou de stocks d'inventures, qui n'ont donc jamais été utilisés mais souvent destinés au rebut. L'entreprise Circouleur s'est ainsi spécialisée dans la récupération des fins de pots de peinture sur les chantiers. Ceux-ci

sont ensuite mélangés et reformulés afin de reproduire de la peinture prête à l'emploi. Sur le village plus de 50 000m² ont été peints avec ce produit issu de la récupération. C'est également le cas du carrelage issu de fin de stock : plusieurs petits gisements ont été ainsi récupérés et utilisés intelligemment dans plusieurs locaux techniques où la disparité des modèles n'a pas été un frein. Enfin sur un secteur du Village, les chutes de céramique des façades ont été utilisées comme remplissage pour un mur à gabion extérieur.

Répartition massive des matériaux de réemploi mis en oeuvre sur le VOP



Afin de quantifier le gain carbone de cette démarche de réemploi, la SOLIDEO a souhaité mesurer les émissions évitées grâce à l'utilisation de ces produits en seconde-vie. Pour cela, la SOLIDEO a considéré, conformément à la réglementation, un impact nul pour les produits de réemploi comparé à l'impact d'un produit neuf en utilisant les FDES produites par le Ministère de la Transition Ecologique. Les 750 tonnes de matériaux de réemploi contribuent à éviter l'émission de plus de 1 700 tonnes de CO₂eq. Les produits qui contribuent le plus à cette réduction sont : le faux-plancher, la moquette, la peinture et les sols souples. Ces gains sont non-négligeables à l'échelle d'un bâtiment. Par exemple, sur le bâtiment de bureau D3 du Village des Athlètes, la mise en oeuvre de faux-plancher de réemploi permet un gain jusqu'à 60 kgCO₂eq/m² de SDP.

Malgré un tonnage important de matériaux de réemploi, le bilan est contrasté car tous les opérateurs n'ont pas atteint leurs objectifs. Plusieurs difficultés se sont présentées lors de la phase de mise en oeuvre des objectifs de réemploi :

- la disponibilité des matériaux dans des quantités suffisantes : il existe aujourd'hui des matériaux facilement démontables et abondants en déconstruction. Les équipements de salle de bain (WC, lavabos, etc.) sont par exemple disponibles sur les plateformes de réemploi. Cependant les gisements étaient souvent trop limités ou avec des références trop disparates pour un chantier de cette taille. Les constructeurs n'ont pas toujours anticipé ce temps de recherche de gisements ainsi que la nécessité de multiplier les fournisseurs ou les contraintes de stockage parfois nécessaires ;

- la saturation des filières de réemploi existantes : seules quelques filières de réemploi sont passées à l'échelle de l'industrialisation : moquette, faux plancher, peinture. Par exemple, tous les opérateurs du Village des Athlètes se sont tournés vers la filière des faux planchers techniques. L'unique fournisseur (Möbius) délivre des produits garantis après léger réusinage. En juin 2022, les opérateurs étaient à la recherche de plus de 37 000 m² de faux plancher mais le fournisseur n'était pas en mesure d'assurer l'approvisionnement d'une telle quantité. Les volumes ont donc dû être revus à la baisse faute d'anticipation sur les commandes ;

- la possibilité de requalification technique et l'assurabilité. Certains matériaux de structure et d'étanchéité associés à des performances techniques élevées ne sont pas garantis en réemploi. Par exemple, une entreprise s'est vu refuser la mise en place de blocs autonomes d'éclairage de sécurité (BAES) de réemploi par son contrôleur technique ;

- les exigences de futurs preneurs. Les produits de réemploi peuvent ne pas correspondre aux exigences esthétiques prévues initialement sur le projet. La tâche est d'autant plus ardue sur ce projet car deux preneurs se succèdent en

très peu de temps : Paris 2024 et l'investisseur final.

Les entreprises ont donc parfois insuffisamment anticipé leur stratégie de réemploi. Elles ont aussi rencontré des difficultés dans la recherche de gisements importants de matériaux de réemploi. Enfin, les entreprises se sont beaucoup tournées vers leurs sous-traitants qui ont privilégié la récupération de surplus sur leurs autres chantiers. On pourra donc regretter que, malgré les volumes colossaux concernés, les objectifs du village n'aient pas contribué à l'émergence d'une nouvelle filière de réemploi avec un acteur du secteur.

En somme, l'intégration du réemploi est un processus qui implique un travail avec l'ensemble des parties prenantes : architectes et bureaux d'études pour la conception, contrôleur technique et assureur pour la requalification des matériaux, fournisseurs et démolisseurs pour la recherche de gisements, client pour la validation des produits. La remise en cause d'un des maillons de la chaîne peut mettre en difficulté l'ensemble de la démarche. La réussite de la démarche de réemploi repose donc sur l'anticipation et le travail en coopération de tous les acteurs du projet.



Cellule spécifique JOP au sein du Booster du Réemploi



identifier les pistes de mutualisation.

Les acteurs sont ainsi accompagnés sur plusieurs enjeux : le sourcing de fournisseurs, la recherche de gisements, les aspects techniques des matériaux de réemploi, les solutions de logistique ou de stockage ainsi que les enjeux assurantiels.

La SOLIDEO a proposé la construction d'une cellule spécifique JOP au sein du Booster du Réemploi. Cette cellule a été initiée en 2022 pour répondre aux problématiques communes des maîtres d'ouvrage et

Les premières sessions de travail ont permis de travailler sur plusieurs filières : cloisons provisoires, substrats, faux planchers et carrelage. Celles-ci ont été complétées de sessions individuelles afin d'approfondir les problématiques.

Les derniers travaux fin 2023 ont porté sur la préparation de la phase réversibilité et l'objectif de réemployer les matériaux provisoires qui seront démontés. Un catalogue a été édité afin de mettre en valeur ces futurs matériaux de réemploi auprès de repreneurs. Un outil de calcul des surfaces de stockage nécessaires a également été fourni aux opérateurs immobiliers.

b. Initiation des démarches de réemploi sur les autres ouvrages

D'autres ouvrages olympiques ont également mis en œuvre des matériaux de réemploi : en répondant aux objectifs de la SOLIDEO, en s'imposant volontairement des objectifs ou bien parce que le réemploi était un levier d'atteinte du bilan carbone.

Au Village des Médias, un des opérateurs immobiliers, s'était fixé l'objectif de mettre en œuvre trois tonnes de matériaux de réemploi. Il a finalement mis en œuvre plus de 5,8 tonnes de réemploi uniquement sur des matériaux utilisés sur des aménagements extérieurs : des dalles de béton pour les toits terrasse et des murs en béton préfabriqués utilisés en bordures de jardinières. Bien qu'une variété plus importante de produits eût été choisie lors de la phase étude, le maître d'ouvrage et son AMO, ont maintenu leur ambition grâce aux entreprises des lots d'aménagement extérieurs qui n'étaient pas initialement concernés par la démarche.

Pour les équipements sous maîtrise d'ouvrage SOLIDEO, les matériaux de réemploi ont été mis en œuvre :

- sur le Groupe scolaire de Dugny, où l'ensemble des façades est conçu avec un camaïeu de briques et plaquettes de réemploi. Ces matériaux sont issus des fins de stocks d'une entreprise du Val de Loire ;
- sur le Gymnase du Bourget, qui contient 4 types de matériaux de réemploi : des dalles de plafond, des sanitaires, des chemins de câble et une nacelle ;

Plaine Commune Développement a mis en œuvre sa charte d'économie circulaire sur le chantier des espaces publics de l'écoquartier fluvial. Une volonté de mise en œuvre de matériaux de réemploi avait donc été inscrite dans les différents marchés, proposant notamment un opus incertum en éléments de déconstruction de béton et des pavés de réemploi. Au cours du chantier, les surfaces de pavés de réemploi ont été réduites de près de 1 000 m² mais atteignent tout de même 1 400 m². En s'appuyant sur le retour d'expérience de la première partie de l'écoquartier livré quelques années plus tôt, une partie des pavés ont été remplacés par du béton contenant des agrégats recyclés. Il

s'agit ici d'un constat important et fréquent sur d'autres ouvrages : la mise en œuvre et la qualité des pavés de réemploi ne permettent souvent pas d'atteindre des surfaces très planes, ce qui entre en conflit avec l'ambition de la SOLIDEO portant sur l'accessibilité universelle. Les revêtements en matériaux de réemploi, qui pourtant représentent une opportunité en volume considérable, sont donc à éviter sur les espaces destinés à être circulés en fauteuil roulant.

Concernant ces ouvrages, les matériaux choisis et les volumes concernés ont valeur de démonstrateur sans permettre encore le passage à l'échelle de nouvelles filières. On se situe donc aujourd'hui dans une phase d'acculturation des acteurs de la construction au secteur du réemploi et au développement de nouvelles compétences.

c. Le réemploi sur les espaces publics du Village des Athlètes, riche d'enseignements

Lors de la conception des projets en 2019, la mise en œuvre de matériaux de réemploi dans des bâtiments avait déjà été testée par la profession dans quelques cas. En revanche, cette démarche était complètement novatrice dans le cadre de la conception d'espaces publics. La SOLIDEO a inscrit cet objectif dès la consultation de sa maîtrise d'œuvre avec comme consigne d'activer ce levier de performance pour la réduction du bilan carbone. Une compétence réemploi au sein de la maîtrise d'œuvre a ainsi pu permettre de déployer des démarches innovantes sur le projet.

Un projet de conception ambitieux a donc été dessiné comprenant des objectifs de réemploi pour l'ensemble des lots :

- le recours à des matériaux modulaires en réemploi, notamment les pavés, les platelages et certains parements ;
- le réemploi de matériaux pour les mobiliers notamment en acier et bois ;
- les mâts d'éclairage, fabriqués à partir d'éléments d'échafaudages en métal. Cette démarche, enclenchée avec les équipes de conception, a été rendue possible par une forte anticipation. Le designer a conçu des mâts adaptés, cohérents avec l'ensemble du mobilier, à partir d'un gisement abondant et disponible. Cette pratique largement répli-



Freins liés à la mise en œuvre d'un lot 0 en réemploi

En parallèle des études de projets, s'est rapidement posée la question de la taille très réduite du marché de matériaux de réemploi pour ce type de projet ainsi que du manque d'expérience des entreprises de travaux dans la recherche de gisements de réemploi. Une des solutions étudiées était la mise en place d'un lot 0 de fourniture de matériaux de réemploi. Découper ainsi les marchés avec une partie dédiée à la fourniture de matériaux de réemploi pouvait permettre d'augmenter le taux de matériaux issus du réemploi en levant plusieurs freins présents dans un marché de travaux classiques :

Tout d'abord, cela permettrait d'avoir une entreprise dédiée à la recherche de matériaux de réemploi, en identifiant les produits dont la qualité est éprouvée mais en laissant également la possibilité à de nouvelles filières d'émerger. Des entreprises de travaux, qui ne sauraient où se fournir en réemploi, auraient pu ainsi chiffrer uniquement la pose sans prendre de risque.

Cela offrirait également des avantages en termes de planning et logistique : la publication de ce lot pourrait être anticipée pour permettre

une recherche de gisement plus longue, et d'anticiper les besoins de stockage de ces matériaux ainsi que la logistique mutualisée de livraison sur chantier.

Cependant dans le cadre de ce type de marché se pose la question de la responsabilité entre la fourniture et la pose. En cas de sinistre, il faudrait alors déterminer si cela est lié à un problème de fourniture ou un problème de pose. Il serait également crucial de disposer d'une traçabilité complète des matériaux de réemploi et d'être en mesure de juger de leur qualité.

La SOLIDEO a ainsi mené toutes ces réflexions avec l'ensemble des acteurs du projet : maîtrise d'œuvre, service marché et direction. Les freins identifiés ont été jugés trop importants dans le temps imparti. En effet, avec le manque de retour d'expérience, il aurait été complexe de rédiger correctement le partage des responsabilités sur un tel marché et la SOLIDEO ne disposait pas des quelques semaines nécessaires à la réalisation de ce travail. Il a donc été décidé de recourir à un marché de travaux plus courant proposant des objectifs de réemploi assortis de pénalités.

cable peut aboutir à la création d'une gamme de produits d'éclairage de réemploi. Des critères de jugement des offres ont été inscrits dans les consultations, permettant de favoriser les meilleures propositions en termes de réemploi et établir un système incitatif de pénalités.

Finalement, la mise en œuvre des mâts d'éclairage en réemploi a permis une économie carbone de 251 tonnes. La conception de ce produit avait été très bien anticipée par la maîtrise d'œuvre et n'a causé aucune difficulté à l'entreprise titulaire du lot éclairage. De plus, ce produit très bien pensé a également inspiré les collectivités locales présentes sur le village qui sont intéressées pour reproduire cet essai sur d'autres projets de leur commune.

Le bilan concernant les autres matériaux de réemploi est plus mitigé. De nombreux matériaux avaient été visés : tuteurs, ganivelles,

platelage, bois pour le mobilier, pavés, etc. Finalement, seuls 3 242 m² de pavés issus du réemploi ont été mis en œuvre soit 17% au lieu des 70% visés. Cela représente un gain carbone de 124 tonnes de CO₂eq.

Deux problématiques ont été rencontrées : la première concerne des changements ayant eu lieu en cours de chantier à la demande de la direction de projet ou des collectivités et notamment l'utilisation de bois plus résistant en extérieur sur les platelages et les mobiliers et donc non disponible en réemploi. Le deuxième problème est l'absence d'AMO réemploi pendant toute la phase chantier et donc le manque de suivi des entreprises de travaux qui n'ont pas bien mesuré les ressources nécessaires à la recherche de gisements.

d. Les matériaux recyclés généralisés mais difficilement valorisables dans le bilan carbone

Les ouvrages olympiques ont tous recours à des matériaux issus du recyclage, tels que l'acier de ferrailage. Pour les projets pour lesquels cela était pertinent, des objectifs chiffrés de recyclage ont été contractualisés.

La couverture du court Suzanne Lenglen est portée par une structure métallique de 1368 tonnes. En phase conception, la Fédération Française de Tennis et la SOLIDEO ont retenu des objectifs ambitieux avec 100% d'acier recyclé pour les poutres et poutrelles en acier et 50% d'acier recyclé minimum au total. Il était initialement prévu un approvisionnement en profilés aciers de type « Histar », éléments de structure bas carbone, réalisé à partir d'aciers 100% recyclés. Cependant, le contexte géopolitique, et en particulier le conflit entre l'Ukraine et la Russie, a perturbé les approvisionnements de la filière des aciéries françaises et il n'a pas été possible de s'approvisionner comme prévu initialement. Finalement l'opération a tout de même atteint un très bon taux d'acier recyclé, à 63% au

total, surpassant l'objectif, mais inférieur au 79% projeté au démarrage des travaux. Ce changement d'acier a également généré une augmentation du bilan carbone de près de 400 tonnes CO₂eq.

Outre les filières historiques comme les métaux, les ouvrages ont également largement utilisé les filières de recyclage classiques, comme le béton recyclé in situ en grave (voir page 91).

Pour d'autres produits de gros œuvre, plâtrerie ou isolation, l'utilisation de matières issues du recyclage se valorise beaucoup moins bien dans le bilan carbone. D'une part, la réalisation de FDES collectives ne permet pas d'identifier les avantages d'un produit en particulier. D'autre part, l'utilisation de matières recyclées peut n'avoir qu'un très faible impact sur l'empreinte carbone globale du produit. C'est notamment le cas pour le béton dont l'impact carbone est largement tributaire du ciment, bien que l'utilisation de granulats recyclés apporte une amélioration considérable de l'impact sur les ressources naturelles. La comptabilité carbone n'est donc pas toujours l'outil pertinent pour faire apparaître les économies réalisées sur les flux de matière.



Des sièges de gradin en plastique recyclé pour le Centre Aquatique Olympique et l'Arena Porte de la Chapelle

Avec l'appui du Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO, les sièges de gradins de l'Arena Porte de la Chapelle et du Centre Aquatique Olympique ont été intégralement réalisés par l'entreprise SAS Minimum à partir de déchets plastiques locaux.

Le plastique est issu de différents collecteurs et centre de tri de déchets plastique ainsi que de bouchons de bouteilles de shampoing collectés auprès de partenaires.

Au total, près de 10 500 sièges (7987 à l'ARENA, 2 500 au CAO) auront été créés de cette manière, permettant le recyclage de plus de 100 tonnes de déchets plastiques.

La portée de cette innovation est triple :

- d'un point de vue environnemental : le taux de 100% de matières recyclées dans ce type de produit constitue une première ;
- au niveau du process qui utilise la technique de la thermo-compression en s'affranchissant des étapes de régénération du plastique ;
- dans sa portée sociale et locale, en utilisant le « circuit court » à la fois pour la collecte (pour une faible part) et la transformation des déchets.



Les matériaux circulaires présents dans la démarche artistique de la SOLIDEO

La démarche artistique de la SOLIDEO s'est appuyée sur un double récit : témoigner du passage éphémère des jeux mais surtout valoriser l'histoire du territoire. C'est ainsi que deux œuvres installées sur des ouvrages olympiques se sont emparées de la thématique de l'économie circulaire via la réutilisation de matériaux locaux.

La première œuvre est le Jardin des Mâts de l'artiste Jan Kopp installée au cœur du Village des Athlètes. Cette œuvre symbolise une forêt de mâts constitués de perles précieuses renfermant des trésors cachés témoins de la vie du XXI^{ème} siècle. Dès janvier 2022, l'artiste a mené un travail collaboratif avec la coopérative de Saint-Denis « le 6b ». De nombreuses déchèteries et matériaux d'Île-de-France ont été mobilisées afin de récolter plus de 500 matières différentes permettant la réalisation de perles uniques. Jan Kopp organise aussi des balades urbaines afin

de récolter des déchets sur la voie publique à qui il offre une seconde vie en les intégrant à la composition de ses matériaux.

Au sein du Village des médias a été installée une autre œuvre : Vieille Mer de Stefan Shankland. Il s'agit d'une œuvre réalisée avec des gravats récupérés lors de la construction des immeubles du Village des médias. Ce matériau créé par l'artiste porte le nom de Marbre d'Ici. C'est ainsi 500kg de chutes de briques de façades et d'autres déchets inertes de chantier qui ont été concassés puis intégrés dans la composition d'un béton recyclé. Les dalles de béton sont coulées à l'état liquide pour créer des tableaux qui évoquent les métamorphoses d'un monde en formation, à l'état plastique, liquide. Ces 15 œuvres uniques ont été installées dans les halls des immeubles du village. Le matériau Marbre d'Ici a également été utilisé pour créer les assises des bancs présents sur la place olympique au Village des Athlètes.



Technique Marbre d'Ici par Stefan Shankland



Un des mâts composant le Jardin des mâts de Jan Kopp sur le Village des Athlètes

C. DÉCONSTRUCTION SÉLECTIVE ET VALORISATION DES MATÉRIAUX

Le programme de la SOLIDEO compte un nombre important de rénovation d'équipements sportifs mais comprend également la déconstruction de bâtiments. Ces chantiers génèrent des flux importants de matériaux et déchets : gravats de béton, plâtre, métaux, bois, etc. Les terres excavées lors de la phase de viabilisation et de terrassement en représentent le plus grand volume. Dans le cadre de sa stratégie d'excellence environnementale, la SOLIDEO a souhaité mettre à profit cette mine urbaine et a encouragé le réemploi de ces matériaux au sein même des projets.

1. Dépose et réemploi des matériaux déconstruits

a. Le diagnostic ressources et les objectifs de réemploi

Dès 2018, la SOLIDEO a imposé sur l'ensemble des ouvrages en déconstruction ou en réhabilitation la réalisation d'un diagnostic ressources. Ce diagnostic est une étude quantitative et qualitative des matériaux pour déterminer leur potentiel de réemploi sur un projet. Il complète le diagnostic réglementaire qui ne concernait que les déchets et leurs filières de valorisation et de recyclage. La SOLIDEO a été précurseur sur le sujet puisque, depuis 2023, le diagnostic réglementaire a

été élargi pour comprendre le potentiel de réemploi et se nommer ainsi diagnostic PEMD (Produits Equipements Matériaux Déchets).

17 diagnostics ressources ont donc été effectués sur des ouvrages aussi divers que le Grand Palais, la Piscine Georges Vallerey, ou la ZAC du Village des Athlètes. Certains de ces diagnostics ont ainsi amené des maîtres d'ouvrage à définir des objectifs de réemploi des matériaux dans leurs lots de curage. La Ville de Paris a ainsi imposé sur ses ouvrages en rénovation un objectif très ambitieux de 10% de déchets réemployés directement sur le projet ou ex situ.



Déconstruction et réemploi sur le Village des Athlètes

Une quinzaine de bâtiments présents sur la ZAC Village Olympique et Paralympique ont été déconstruits : entrepôts, bureaux, hôtel ou résidence. La déconstruction, contrairement à une simple démolition, permet de valoriser au maximum les matériaux. Après un premier curage pour réemploi, puis un curage classique et un tri des éléments de second-œuvre, sont intervenus la démolition et le concassage des bâtiments.

Des diagnostics ressources ont été effectués pour chaque bâtiment afin d'évaluer le potentiel de réemploi et fixer les objectifs du marché de déconstruction. L'entreprise de démolition Prodemo et son sous-traitant Backacia ont procédé au curage et à la vente des éléments valorisables en réemploi. Le déconstructeur a procédé à des déposes soigneuses et les matériaux ont été mis en vente aux particuliers et artisans dans trois showrooms présents sur le Village.

Plus de 872 tonnes de matériaux connaissent ainsi une seconde vie : sanitaires, radiateurs, luminaires, etc.

Plusieurs éléments emblématiques ont été préservés comme des escaliers métalliques, des box médicaux ou encore une très grande quantité de racks de stockage en acier retournée auprès du fabricant pour rénovation et vente d'occasion. Ces matériaux ont été majoritairement revendus à des entreprises (85%), mais aussi à des particuliers (13%) et des associations (2%).

La démarche a rencontré un véritable succès et les objectifs fixés ont été atteints pour une grande majorité des bâtiments déconstruits.

La déconstruction du bâtiment « 5 Seine » qui présentait des équipements de très bonne qualité a généré 50 tonnes de matériaux destinés au réemploi pour un revenu de revente de près de 50 000€. Plusieurs difficultés ont cependant été soulevées lors du chantier et notamment les fortes contraintes de planning ne permettant pas les déposes délicates de verrières ou d'escaliers.

b. La dépose et seconde vie des matériaux

Une fois les diagnostics réalisés et les objectifs posés dans les marchés, le principal enjeu résidait dans la gestion opérationnelle de ces matériaux en phase chantier : dépose, stockage, remise en état éventuelle et réemploi in situ ou ex situ.

Plusieurs types de matériaux ont ainsi pu trouver une seconde vie :

- des éléments de structure : le remplacement du toit de la Piscine Vallerey datant de 1924 était prévu lors de sa rénovation. Les 25 tonnes de charpente en bois ont ainsi été démontées. Les pannes de bois ont été, pour partie, réutilisées in situ par le menuisier pour réaliser des meubles et de la signalétique, et le reste donné à une association de réemploi. Le boulodrome du parc des sports du Bourget a également été démonté et revendu soit 10 tonnes de structure métallique.

- des éléments de second-œuvre : dans le cadre de sa rénovation, le parquet de la Grande Nef de l'Ile des Vannes qui a été en partie abimé a été remplacé par un sol sportif souple. Il a été prévu dans le cadre du projet une dépose soignée du parquet. Finalement, ce sont 2000m² de parquet sur les 2500m² qui ont été déposés par une entreprise d'insertion Tricycle Curage missionnée par le titulaire du lot curage. Les lattes ont été soigneusement conditionnées afin d'être transportées dans de bonnes conditions. Après sa dépose et son conditionnement, le parquet a été acheminé jusqu'à leur atelier afin d'être retravaillé et transformé. Ce parquet rénové sera ensuite posé dans les showrooms de matériaux de réemploi du groupe Tricycle.

- des éléments techniques et sportifs : les travaux de modernisation du Stade de France avaient pour objet le remplacement de l'éclairage sportif, les 216 projecteurs d'éclairage déposés ont été cédés à plusieurs repreneurs afin d'éclairer d'autres équipements. Lors de la rénovation des terrains du stade Yves du Manoir, de nombreux équipements sportifs et 12 000m² de gazon synthétique ont également été déposés et récupérés par des associations sportives locales.

Globalement la mise en place d'objectifs de dépose et de réemploi a permis la mobilisation large de tous les acteurs de chantier et est une

vraie réussite sur l'ensemble des ouvrages. On décompte, à fin juillet 2024, 1415 tonnes de matériaux déposés pour réemploi sur une dizaine d'ouvrages.

Des ajustements ont été réalisés en phase chantier lorsque des difficultés ont été rencontrées et plusieurs enseignements peuvent être tirés :

- la liste des éléments prévus initialement lors du diagnostic doit être adaptée pour prendre en compte la qualité réelle des matériaux, certains s'avèrent trop endommagés pour être conservés.

- il est intéressant de réaliser le diagnostic amiante en amont du diagnostic ressources car des matériaux peuvent en contenir ou être fixés avec des colles amiantées, ce qui bien sûr empêche leur dépose pour réemploi.

- un protocole de dépose précis doit être rédigé pour les éléments les plus techniques à déposer afin de réduire les risques d'endommagement lors des manipulations.

- la mise en place d'espaces de stockage de taille suffisante est cruciale et plus particulièrement lors des rénovations en site occupé, cela doit être anticipé en phase de préparation de chantier.

- enfin, la présence d'un AMO réemploi afin d'accompagner les entreprises dans leur démarche de réemploi semble être le facteur clé de réussite sur les projets.

A ces problématiques s'ajoute également, pour le réemploi de matériaux, les freins assurantiels et techniques. Dans la plupart des cas, le réemploi in situ a concerné des matériaux non impliqués dans la structure ou l'enveloppe et donc moins concernés par des garanties. Cependant, des expérimentations ont été menées sur certains ouvrages et notamment sur le Gymnase de Poissonniers avec le réemploi d'éléments de façade. Par ailleurs, sur les 5 pompes à chaleur du Hall 3 qui ont été déposées par le sous-traitant, 3 ont été récupérées par le maître d'ouvrage pour être réinstallées sur un autre site, les deux dernières ont été vendues pour un projet situé à Meudon. Cette démarche a offert un retour d'expérience intéressant sur la valorisation économique et les contraintes d'assurance d'un élément technique du bâtiment.



Réemploi de la façade du gymnase des Poissonniers

L'un des exemples emblématiques de réemploi réalisé lors de la rénovation du Gymnase des Poissonniers est le détournement de l'usage du bardage verrier Profilit tel qu'il était sur le bâtiment existant. Verre profilé translucide, le réemploi du Profilit a constitué un élément structurant du projet étant donnée l'importance et la qualité du gisement identifié. Un travail minutieux a été mené sur ce produit afin de le réemployer in situ. Le choix architectural et technique a été de transformer l'usage initial de murs rideaux double peau en bardage simple peau sur la façade sud du bâtiment. Le défi était de taille et risqué puisqu'il a nécessité une dépose soignée, un découpage et un nettoyage des éléments avant qu'ils soient peints pour assurer l'opacité. Pour une surface de 1400m² de Profilit simple couche existant en structure, 200m² issus du réemploi in situ ont été mis en œuvre en bardage, soit 3,9 tonnes de matériau.

Par ailleurs, ce projet a soulevé la question de l'adaptation des règles techniques et

exigences réglementaires pour attester de la validité du réemploi d'un produit. Ainsi, des essais mécaniques de résistance aux chocs ont dû être réalisés sur le Profilit afin de prouver que la résistance du matériau était suffisante.

Contre toute attente, aucun laboratoire en France n'a pu réaliser ces tests. Il a fallu traverser les frontières jusqu'en Espagne pour qu'un laboratoire puisse tester la résistance de la Profilit conformément à ce qui était demandé par le bureau de contrôle. Face à cette aberration, les architectes du projet ont ainsi évoqué le besoin d'une sensibilisation plus large des bureaux de contrôle au réemploi. Cette action pourrait à terme faire évoluer les exigences demandées sur les produits et complexes mis en œuvre issus du réemploi vers plus de flexibilité. Il a aussi été mentionné le besoin de développer en France un laboratoire formé voire spécialisé pour les produits issus du réemploi.

2. La valorisation des terres excavées in situ et ex situ

La construction des ouvrages olympiques a majoritairement conduit à la production excédentaire de terres excavées pour lesquelles des solutions de valorisation ont été recherchées.

Sur la ZAC Village Olympique et Paralympique, le dénivelé du terrain induisait un volume important de terres excavées. Le passé industriel de la zone a, en outre, entraîné une pollution étendue des sols. En raison de délais trop contraints, la dépollution des terres a été réalisée hors chantier sur des plateformes dédiées.

Ainsi 568 904 tonnes de terres provenant de la viabilisation des espaces publics et des lots immobiliers ont été évacuées. Des plateformes ont été mises en place pour stocker les lots de terres dans l'attente des

résultats d'analyses de pollution. Elles ont ensuite été dirigées vers les filières adéquates : valorisées en remblaiement de carrière pour les terres inertes, traitées en biopile pour les terres polluées ou stockées en déchets non dangereux.

Malgré les impératifs de calendrier, la pollution des sols plus importante que ne présageaient les études et l'exiguïté des zones de stockage, la gestion des terres excavées sur la ZAC Village Olympique et Paralympique est un véritable succès accompagné d'une stratégie exemplaire d'évacuation par voie fluviale.

Sur la ZAC du Cluster des Médias, les terres excavées générées par les lots immobiliers ont été réutilisées par le chantier du terrain des essences (page 142).

3. La valorisation du béton, des déchets de déconstruction et de chantier

Les déconstructions génèrent également un volume important de déchets de béton issus des structures des bâtiments. Lorsque l'espace disponible le permettait, ces déchets ont été concassés sur place et éventuellement réutilisés in situ.

La déconstruction des bâtiments situés sur la ZAC Village Olympique et Paralympique a généré 58 760 tonnes de déchets inertes (béton, briques, tuiles, etc.). 99% de ces matériaux ont été recyclés :

- concassés sur site, les granulats ont été directement réutilisés en sous-couche de voirie sur le projet ;
- évacués à Bruyères-sur-Oise, les gravats ont été concassés et ont fait l'objet d'une expérimentation pour la production de substrat pour accueillir les plantations des espaces publics du VOP (page 144).

La déconstruction du Hall 3 a généré 6 872 tonnes de déchets de béton qui ont été concassés et criblés sur site. Les granulats recyclés ont été utilisés directement en couche de forme et intégrés en grave ciment aux abords du nouveau bâtiment, dans des proportions moins importantes qu'initialement prévu en raison du planning.

La déconstruction génère d'autres déchets : métal, plâtre, bois, triés sur site puis dirigés vers les filières de valorisation.

Sur la ZAC du VOP, malgré l'essai de plusieurs filières émergentes pour le recyclage de la laine de verre et des menuiseries vitrées, un grand nombre de déchets n'ont pas pu être triés sur le chantier et ont été évacués en mélange. Finalement, 32% des déchets issus des éléments de second œuvre sont entrés dans des filières de recyclage. Cela s'explique d'une part par l'agglomération de matériaux rendant impossible leur valorisation : polystyrène collé au béton, fibralith collée au plâtre, etc. et d'autre part par la qualité du tri à la source. Au total, en ajoutant la valorisation énergétique, 66% de ces déchets ont été valorisés.

La gestion des déchets des chantiers de construction faisait également partie des ambitions de la SOLIDEO, dans la logique de chantier propre. La SOLIDEO avait fixé avec tous les maîtres d'ouvrage un objectif de 90% de réemploi et de valorisation des déchets issus des chantiers. Cet objectif n'incluait pas le traitement des déchets dangereux, ni la valorisation in situ de terres excavées, ni la valorisation du béton en grave. Le suivi environnemental du chantier a été réalisé par la SOLIDEO pour les opérations sous sa responsabilité en tant qu'aménageur, le reste des opérations étant suivies par chacun des maîtres d'ouvrage en responsabilité. Il comprenait des visites et un reporting mensuels avec un suivi complet des engagements environnementaux.

Sur la plupart des chantiers l'objectif de 90% de valorisation a été atteint. Des méthodes de tri diverses ont été mises en place sur les chantiers :

- sur la ZAC Village Olympique et Paralympique, le tri était assuré sur site par la présence de 4 bennes pour les flux majoritaires des déchets produits (ferraille, bois, gravats minéraux et déchets non dangereux résiduels) et des bennes spécifiques pour les déchets de plâtre et d'emballages carton. Les déchets dangereux étaient traités spécifiquement ;
- sur le Village des Médias, le tri n'a pas été réalisé directement sur site en phase gros-œuvre. La distinction selon les différents flux de déchets et la valorisation étaient assurées par les plateformes de tri à la réception des bennes ;
- les grands chantiers comme l'Arena Porte de la Chapelle mobilisaient un homme tri chargé de contrôler et sensibiliser toutes les équipes travaux aux différents tris à réaliser.

4. Logistique optimisée et bas-carbone

Les flux de logistique chantier sont partie intégrante de la stratégie d'économie circulaire appliquée sur tous les projets olympiques. Les flux les plus conséquents ont concerné l'évacuation des déblais, mais une réflexion a également été poussée sur l'approvisionnement.

a. L'évacuation des déblais en fluvial

En proximité immédiate avec la Seine, le Village des Athlètes avait tous les atouts pour développer la logistique fluviale. Très tôt, la SOLIDEO a ainsi imposé dans les cahiers des charges son utilisation pour l'évacuation des déblais. Une convention a été signée en 2020 entre l'Etat, la SOLIDEO, HAROPA Ports de Paris et Voies navigables de France afin de préparer l'organisation de cette logistique. Le port de Saint-Denis à moins d'un kilomètre du village a rapidement été identifié comme point d'entrée des péniches de transport.

Sur le périmètre du Village des Athlètes, 530 981 tonnes de déblais issus de huit chantiers ont été évacuées par voie fluviale : comprenant la viabilisation des deux ZAC, les lots immobiliers, l'enfouissement des lignes de haute tension, la reconfiguration de l'échangeur autoroutier A86 et la réalisation du franchissement de la Seine.

La circulation de 26 549 camions a ainsi été évitée dans les rues de Saint-Denis et Saint-Ouen. 95% des déblais liés aux travaux de viabilisation de la SOLIDEO ont été évacués par voie fluviale ainsi que 78% des déblais de travaux d'enfouissement des lignes de haute tension menés par RTE.

b. Les flux d'approvisionnement

Dans le cadre du chantier du Village des Athlètes, la SOLIDEO a souhaité mettre en place une démarche poussée pour l'organisation logistique des chantiers. Elle devait ainsi répondre à plusieurs objectifs : la sécurité des riverains, la tenue des délais de livraison, la régulation des flux à l'échelle du territoire, la réduction du nombre de véhicules et l'optimisation de leur remplissage et enfin la garantie des temps de trajet de livraison.

Cela s'est traduit pour la SOLIDEO par la mise

en place d'un système complet de régulation des flux logistiques, Fluideo, développé avec Mobility by Colas. Ce système incluait, pour l'ensemble des opérations de la ZAC Village Olympique et Paralympique, la réservation de créneaux de livraison sur une plateforme numérique, la planification et l'organisation des flux. Au cœur de ce dispositif, la SOLIDEO a installé une aire de régulation déportée à quelques kilomètres du village.

Cette organisation a permis une réduction des émissions carbone liée à l'optimisation des trajets et temps d'immobilisation moteur allumé. Le bilan fait apparaître 123 434 réservations de livraison sur le système et une réduction du bilan carbone évaluée à 102,4 tonnes de CO₂eq.

Sur le chantier du stade Yves du Manoir, l'entreprise générale a également mis en place un suivi très complet des émissions de CO₂ liées à la logistique. Elle a ainsi référencé le nombre de livraisons et les distances de transport d'une trentaine de fournisseurs, ainsi que les évacuations de déblais et de déchets, pour en déduire les émissions de CO₂ liées au transport. Sur 24 mois, 65 tonnes de CO₂eq ont ainsi été émises, dont les deux principaux contributeurs sont l'évacuation des terres sur des sites situés à moins de 30 kilomètres pour 30 tonnes de CO₂eq et l'approvisionnement du bois de gros-œuvre provenant d'un peu moins de 400 kilomètres pour 15 tonnes de CO₂eq.

Ces démarches sont novatrices pour des chantiers, mais il est difficile de réaliser une mise en perspective de ces résultats face au manque de références à la fois sur les émissions liées à la logistique et sur les gains des actions de régulation des flux.

Outre l'optimisation des flux, la logistique fluviale a également été un point clé pour faciliter la réalisation de plusieurs chantiers et notamment sur l'écoquartier Fluvial, zone du Village des Athlètes située sur l'Île-Saint-Denis. Des infrastructures, les ducs d'Albe, ont été posés spécifiquement au pied des quais de l'île pour assurer l'arrimage des barges au plus près du chantier.

Des modules préfabriqués en bois ont été acheminés par voie fluviale par l'entreprise

E-Loft depuis Haulchin (59) jusqu'à L'Île-Saint-Denis, pour la construction d'une résidence étudiante au sein du Village des Athlètes. Entre 11 et 16 modules ont été livrés chaque semaine par bateau. Au total : 141 modules de bois ont été livrés par voie fluviale en 2023, soit l'équivalent de 140 camions évités.

Les modules préfabriqués étaient récupérés directement dans la péniche par la grue du chantier avant d'être installés sur le bâtiment. Également, 2 800 m² de façades en bois ont été livrés par voie fluviale par l'entreprise

Rubner entre janvier et février 2023 du port de Limay et à destination du chantier.

Que ce soit pour l'évacuation et l'approvisionnement fluvial ou la régulation logistique, ces démarches ont nécessité un travail de coopération entre une multiplicité d'acteurs : opérateurs fluviaux et port, collectivités et autorités publiques, entreprises, ainsi que de nombreuses sessions d'information et périodes de test pour assurer une bonne appropriation des systèmes par les entreprises titulaires et leurs sous-traitants.



Valorisation carbone des approvisionnements fluviaux de matériaux de second-œuvre

Sur deux secteurs du Village des Athlètes, les entreprises de construction et promoteurs immobiliers ont souhaité dépasser les objectifs imposés sur l'évacuation des déblais par voie fluviale. Ils se sont tournés vers Point P afin de s'approvisionner par la voie fluviale, d'abord en matériaux de gros œuvre comme les parpaings puis pour des matériaux de second œuvre. Des livraisons régulières ont eu lieu jusqu'au port de Saint-Denis, puis la livraison du dernier kilomètre jusqu'au chantier a été effectuée par des camions roulant au bio-gaz.

Afin d'encourager ces initiatives, la SOLIDEO avait proposé un ajustement de la méthodologie de bilan carbone appliquée aux ouvrages olympiques afin de prendre en compte le gain carbone associé à ce passage en fluvial. En effet, dans les Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES), le module de

transport est moyenné à l'échelle nationale et il est trop coûteux et peu intéressant pour les entreprises de s'engager dans la réalisation de FDES spécifiques pour des chantiers présentant une chaîne logistique vertueuse, d'autant plus que le module transport représente environ 5% de l'impact total du produit.

La SOLIDEO a donc proposé la mise en place d'un gain carbone forfaitaire de 5,5kg par tonne de matériaux transportés par la voie fluviale, calculé sur la base des éléments de la chaîne logistique de Point P. Finalement, 41 livraisons ont été effectuées, soit 467 tonnes de matériaux transportés, ce qui représente une réduction des émissions de CO₂ de 2,5 tonnes. Le gain carbone de cette démarche est anecdotique, le caractère innovant réside dans la livraison par voie fluviale de matériaux couvrants de second-œuvre : c'est une première.



Transport fluvial des déblais

D. PROGRAMMATION ET EXPLOITATION CIRCULAIRES DES OUVRAGES

L'application de la stratégie d'économie circulaire de la SOLIDEO ne concerne pas que la conception des ouvrages et le cycle des matériaux. Il concerne également la vie de l'ouvrage et la gestion des flux liés à son exploitation mais également, la sensibilisation des usagers à l'économie circulaire.

1. Animer le cycle de l'eau dans les ouvrages

La gestion de l'eau est un des défis de la ville de demain, tant pour ce qui concerne son approvisionnement que pour la gestion des eaux usées. Parmi les ouvrages olympiques, les piscines sont les premiers bâtiments concernés compte-tenu de l'importance des flux en jeu.

a. Les piscines à la pointe de la réutilisation de l'eau

Les piscines et centres aquatiques étant des grands consommateurs d'eau, de nombreuses solutions visant à instaurer des cycles de ré-

utilisation de l'eau ont été mis en œuvre afin de garantir l'atteinte d'objectifs ambitieux de sobriété en matière de consommation en eau. Les résultats de consommation d'eau pour 3 piscines nouvellement construites sont présentés ci-dessous.

Ces bons résultats sont dus à la performance des systèmes permettant la réduction de la consommation eau, et notamment les systèmes récents de filtration beaucoup moins consommateurs d'eau de lavage, mais également grâce aux dispositifs de récupération.

Consommation d'eau des piscines

	Piscine de Marville	Piscine d'Aubervilliers	Centre Aquatique Olympique
Objectif de consommation d'eau (en L/baigneur/jour)	100	100	90
Résultat de consommation d'eau (en L/baigneur/jour)	96	73	85

Le Centre Aquatique Olympique est particulièrement innovant en matière de réutilisation des eaux. En effet, alors que les eaux de fuite, évacuées quotidiennement pour compenser le renouvellement en eau neuve (imposé par la réglementation à 30 litres par baigneur), sont généralement jetées à l'égout, l'équipe projet a pris le parti de récupérer ces eaux après filtration et déchloration. Ces eaux de fuite, après traitement, sont réutilisables à hauteur de 70% du volume pour différents usages. Mais c'est leur réutilisation pour le lavage des plages de la piscine qui

est novatrice et présente un fort intérêt environnemental, car cet usage représente 6% du total des consommations d'eau annuelles.

Malgré le fait que la récupération des eaux de fuite est une pratique courante à l'étranger, le recours à ce dispositif a suscité des échanges longs et complexes avec l'Agence Régionale de Santé (ARS) instruisant le dossier. C'est en particulier la réutilisation de l'eau en intérieur pour le lavage des plages qui a posé un problème : initialement refusée par l'ARS, c'est la parution de nouveaux textes réglementaires

Procédés de récupération d'eau dans les piscines

Piscine de Marville



11 289 m³ d'eau réutilisée

- Récupération d'eau en provenance des lavages et rinçage des filtres et des eaux de fuite
- Stockage dans une bache de récupération et traitement
- Réutilisation pour les sanitaires, le lavage des filtres, l'alimentation des pédiluves et le lavage des locaux techniques extérieurs

Piscine d'Aubervilliers



1 225 m³ d'eau réutilisée

- Récupération d'eau en provenance des eaux de fuite et des pédiluves
- Stockage dans une bache de récupération
- Réutilisation pour les sanitaires

Centre Aquatique Olympique



3 314 m³ d'eau réutilisée

- Récupération d'eau en provenance des lavages et rinçage des filtres, des pédiluves, des eaux de fuite
- Stockage dans un bac de décantation et traitement
- Réutilisation pour les sanitaires, le lavage des filtres, le lavage des plages et le lavage des voiries



Piscine de Colombes

en 2023 autorisant explicitement la réutilisation des eaux grises pour l'usage envisagé qui a permis de débloquer la situation.

D'autres verrous, et notamment réglementaires, subsistent et permettraient, s'ils étaient levés, de réduire les consommations d'eau et favoriser leur réutilisation, comme l'obligation française de réaliser une vidange annuelle complète, qui peut être substituée par d'autres procédés moins consommateurs d'eau dans d'autres pays.

b. L'eau pluviale nouvelle source d'eau pour les bâtiments

D'autres infrastructures sportives mettent en œuvre des procédés de réutilisation de l'eau de pluie pour différents usages.

Le Hall 3 au Bourget dispose de 2 cuves de 20m³ qui couvrent 97% des besoins en eau pour le lavage des sols. L'Arena Porte de la Chapelle couvre 100% de ses besoins pour les sanitaires par une cuve de récupération d'eau de pluie.

L'utilisation de l'eau de pluie pour des usages réglementaires comme les sanitaires, le lavage et bien sûr l'arrosage des espaces verts ont été fortement incités. Il existe cependant d'autres usages pour lesquels les restrictions n'ont pas pu être levées. Le stade Yves du Manoir avait initialement prévu d'arroser ses terrains d'eau de pluie. Malheureusement la fédération internationale de hockey sur gazon n'autorise que l'arrosage par de l'eau potable. Il existe donc encore beaucoup de frein au niveau des normes sportives qui n'encouragent pas la réutilisation de l'eau.

c. Réutilisation des eaux usées : deux démonstrateurs

La réutilisation des eaux grises et des eaux usées est beaucoup plus complexe que la réutilisation d'eau pluviale, car elle nécessite un traitement. Deux ouvrages sont exemplaires sur le sujet : la base de préfecture de police et le bâtiment Cycle, tous deux situés sur le Village des Athlètes.



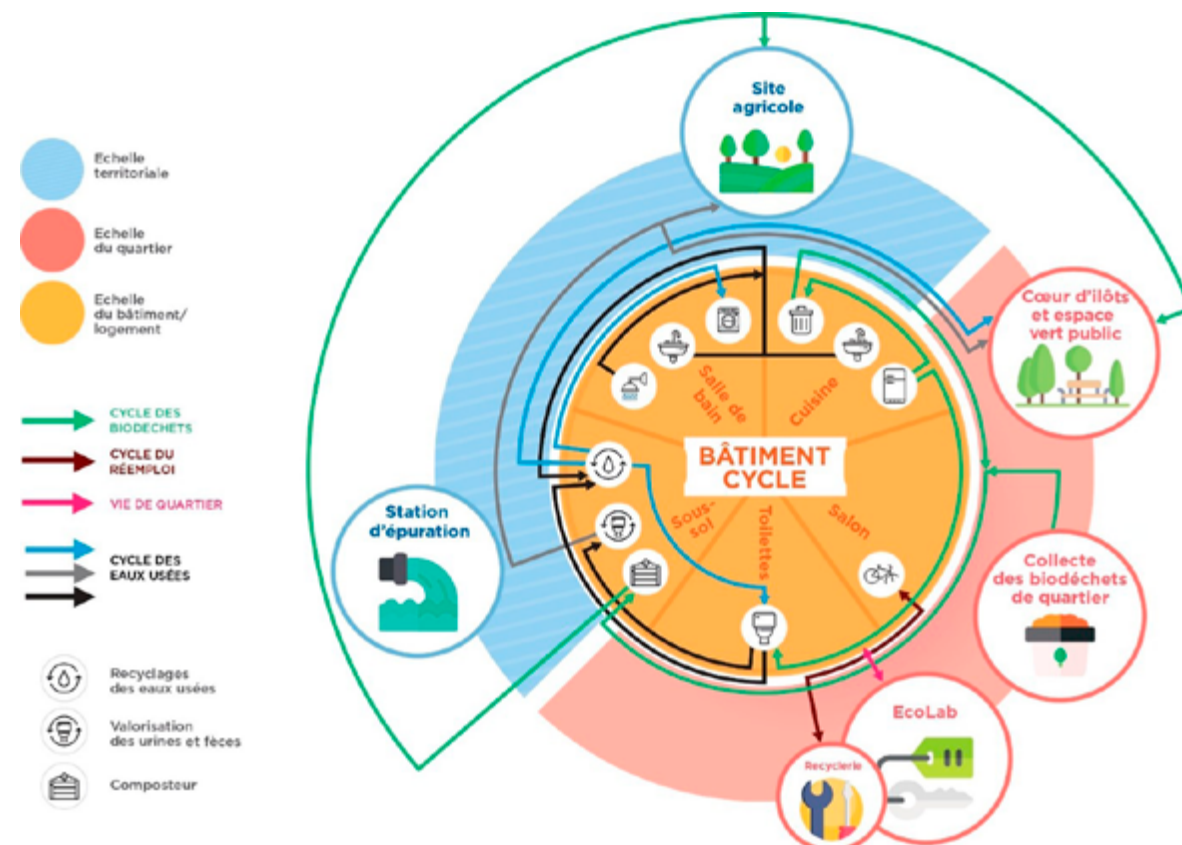
Toiture et noue phyto-épuration de la base mutualisée pour la préfecture de police et la brigade des sapeurs-pompiers de Paris

L'innovation, portée par la SOLIDEO et soutenue par le Fonds Innovation et Ecologie, concerne le traitement des eaux grises, issues des WC et lavabos, par 74 m² de toiture végétalisée phyto-épuration pour réutilisation à l'intérieur (chasses d'eau) et à l'extérieur du bâtiment (arrosage et nettoyage des espaces extérieurs).

Un second système de phytoépuration est également mis en place au niveau de la parcelle pour récupérer les eaux grises de process qui auront ruisselé suite au lavage des véhicules d'intervention dans une noue paysagère et ensuite les réutiliser pour le même usage.

Ces 2 systèmes seront mis en fonctionnement en phase Héritage après les jeux, les performances visées sont une réduction de la consommation d'eau potable de l'ordre de 60%.

La mise en œuvre de ces démonstrateurs permet d'expérimenter à petite échelle des systèmes de traitement des eaux grises et des eaux de process pour une réutilisation locale. Le choix d'avoir eu recours à des systèmes dont les éléments pris individuellement sont plutôt traditionnels permet de rendre les procédés ouverts et facilement répliquables à plus grande échelle.



Un bâtiment démonstrateur de la circularité des ressources

Le bâtiment cycle illustre le paradigme de la circularité des ressources et initie une véritable transition vers des « Bâtiment Ressources » et « Zéro Déchet » en exploitation, limitant fortement les impacts environnementaux et recréant de la valeur locale. Cycle est une réalisation du groupement Icade-CDC Habitat accompagné notamment par l'entreprise Nereus. Le projet est soutenu par le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO.

Le bâtiment se compose de 26 logements et se situe au cœur du Village des Athlètes. L'innovation mise en œuvre dans ce bâtiment porte sur :

- le recyclage de 100 % des eaux usées. Pour atteindre cet objectif, le système combine trois étages de traitement :

- un traitement biologique amont,

- un traitement par nanofiltration dynamique par disques céramiques suivant une technologie unique mise au point par la start-up NE-REUS,

- et un traitement par osmose inverse. L'eau recyclée sera utilisée pour les WC, l'arrosage des espaces verts, l'alimentation des lave-linges et le nettoyage des sols extérieurs.

- le recyclage des urines, qui repose sur le procédé mis au point par la start-up TOOPI Organics, comme bio stimulant agricole ;

- le recyclage des matières fécales en amendements agricoles ;

- la valorisation de l'ensemble des biodéchets en compost.

Le bâtiment vise le recyclage de la quasi-totalité de ses eaux usées (eaux noires et eaux grises) permettant d'économiser 60 % de sa consommation d'eau potable, tout en récupérant leurs calories pour préchauffer l'eau chaude sanitaire.

Si la livraison du bâtiment a été effectuée fin 2023, l'innovation du projet ne sera activée qu'en phase héritage.

Dans le cadre du projet, plusieurs réunions de travail ont été organisées avec l'Agence Régionale de santé d'Ile de France et une demande officielle de dérogation pour la réutilisation des eaux grises a été faite le 9 mai 2023. Deux arrêtés préfectoraux en date du 8 décembre 2023 sont venus valider cette demande d'une part pour l'alimentation des WC, l'arrosage des espaces vert et le nettoyage des espaces extérieurs, et d'autre part pour l'alimentation des lave-linges. Un certain nombre d'exigences y sont indiquées concernant la conception de l'installation et son suivi dans le temps.

Les installations de gestion des eaux noires et de lixiviat des composteurs ne relèvent pas d'autorisations ou de dérogations prévues par la loi. Un dossier a donc été déposé auprès du dispositif France Expérimentation pour faire valider ces systèmes.

Les échanges menés avec l'Agence Régionale de Santé, la Direction Générale de la Santé et France Expérimentation sur le bâtiment cycle ont contribué à la réflexion de l'Etat sur les évolutions réglementaires à entreprendre pour étendre les usages des eaux grises et noires.

2. L'économie circulaire au service des futurs usagers

Il a été primordial pour la SOLIDEO que les objectifs de sa stratégie d'excellence environnementale puissent perdurer pour les futurs usagers des habitants et des quartiers. Ainsi, dès la phase offre des consultations immobilières du Village des Athlètes et du Village des Médias, les opérateurs immobiliers ont proposé des programmes d'activités artisanales et commerciales en cohérence avec ces ambitions. Plusieurs acteurs pressentis pour occuper ces espaces ont une activité directement liée à l'économie circulaire.

La programmation étant liée à la phase héritage, les modalités de contractualisation avec ces futurs preneurs est encore en cours et ces occupants commerciaux devraient arriver dans leurs locaux fin 2025, début 2026 :

- l'Écolab : est conçu comme la régie environnementale du Village des Athlètes,

à la fois conciergerie pour l'ensemble des habitants et centre d'accompagnement dans la pratique des écogestes au quotidien. L'Écolab sera un nouveau QG destiné à partager une culture commune autour de la transition environnementale ;

- la Recyclerie Sportive, présente sur le centre aquatique Olympique et sur le Village des Athlètes, offrira des équipements de sport de seconde main et organisera des activités avec les habitants ;

- d'autres activités de recyclerie et de réparation pourraient être présentes sur le Village des Athlètes : Atelier Chutes Libres, la Textilerie et Solicycle ;

- l'offre de restauration du Centre Aquatique Olympique devrait intégrer une démarche Zéro déchet ainsi que de l'approvisionnement local en collaboration avec les Fermes de Gally.

monnaie locale écologique, mais également d'élaborer une Intelligence artificielle territorialisée et maîtrisée localement, qui permette de prendre collectivement de la hauteur et d'appréhender l'impact et la portée des actions individuelles et collectives.

Lors du lancement de la Carte Eco, 700 habitants et 140 professionnels avaient déjà rejoint l'initiative mais ce programme est destiné à être développé de façon plus poussée en phase héritage.



Capture d'écran de l'application Carte Eco



Carte des synergies territoriales sur la thématique alimentation

3. Créer les outils de l'économie circulaire du quotidien

Consciente que les progrès dans le secteur de la construction et que le développement de solutions vertueuses pour des villes plus durables ne sauraient suffire pour permettre la transition écologique et énergétique des villes, la SOLIDEO a souhaité susciter des initiatives permettant de s'attaquer en profondeur aux changements des comportements et des habitudes de consommation.

Il s'agissait ainsi d'imaginer et concevoir une solution structurante et intégratrice, capable de faire des habitants et des citoyens des acteurs engagés de la transition environnementale, qui, par leurs usages et comportements, seraient à leur échelle contributeurs de la transition écologique et de l'objectif de neutralité carbone.

C'est pourquoi la SOLIDEO a lancé mi-novembre 2021 l'appel à projets « Smart Citizen », dont la concrétisation a d'abord pris forme sur le territoire de Plaine Commune, autour du futur quartier du Village des Athlètes, Saint-Denis, Saint-Ouen-sur-Seine et L'île-Saint-Denis.

Cet appel à projet a été lancé par la SOLIDEO dans le but d'identifier un ou plusieurs porteurs de solutions, capables d'apporter l'ensemble des briques permettant d'accompagner les citoyens vers une transition environnementale dans tous les aspects de leur vie quotidienne.

A l'issue d'une phase de candidature, d'un forum d'enrichissement et d'une phase de préfiguration, le lauréat a été identifié dans le groupement porté par Odyssée, Atos, IRI et eGreen.

Le programme vient structurer un réseau d'action territorialisé, qui connecte les citoyens, les entreprises, les associations et les collectivités, et rassemble autour d'initiatives locales vertueuses qui incarnent aujourd'hui l'économie circulaire « de demain ». Le réseau d'action favorise l'adoption de pratiques durables pour s'alimenter, se déplacer, consommer, habiter et valoriser les ressources locales. Un outil numérique dédié, la « Carte Eco », a été lancé et permettra notamment de valoriser acteurs et actions au travers d'une



Jeu d'action territorial pour inciter à la transformation écologique



PENSER LE CONFORT URBAIN EN 2050

PENSER LE CONFORT URBAIN EN 2050

A. DES OBJECTIFS QUI ANTICIPENT LE CLIMAT À 2050

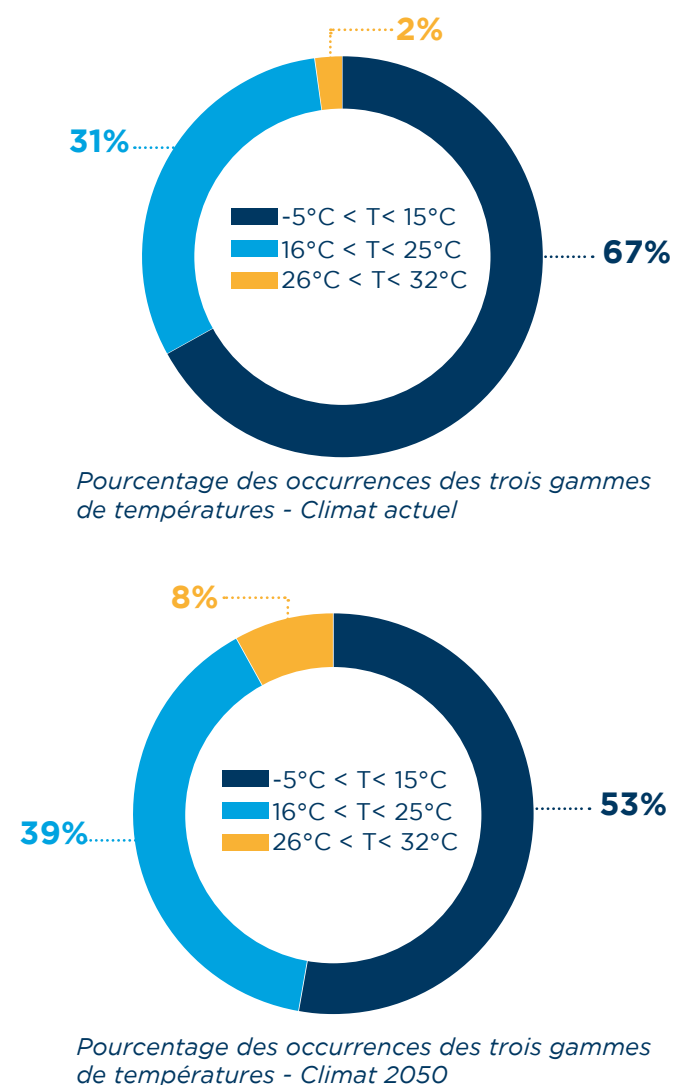
Consciente des conséquences du réchauffement climatique et des évolutions à prévoir en matière de confort urbain, la SOLIDEO a résolument inscrit les projets olympiques et paralympiques dans une logique d'adaptation. L'ensemble des maîtres d'ouvrage a été incité à considérer la résilience comme une question centrale dans la conception de projets adaptés aux évolutions climatiques à l'horizon 2050.

1. Simuler le climat de 2050

Afin de garantir aux usagers des ouvrages olympiques des niveaux de confort satisfaisants en 2050, la SOLIDEO a d'abord engagé avec Météo France un travail de simulation. Le climat 2050 simulé dans le cadre des études est fondé sur le scénario RCP 8.5 (« Business as usual ») des travaux du GIEC. Ces calculs sont basés sur la moyenne de 200 simulations des années 2050 possibles. Un scénario dit « Climat 2050 Moyen » a été modélisé, dans le contexte territorialisé des ouvrages, et a servi de donnée d'entrée lors de la détermination des objectifs puis au cours de la conception des ouvrages. Il laisse entrevoir la normalisation à venir d'événements extrêmes tels que la canicule de 2003. Pour documenter la résilience des ouvrages en cas d'épisode extrême, un scénario correspondant à une année défavorable du climat de 2050 a également été construit.

a. Un climat en moyenne plus chaud

Les projections à l'horizon 2050 montrent une forte augmentation des périodes de forte température, notamment au-dessus de 28°C. Ainsi, concernant le climat moyen actuel, le nombre d'heures où $T > 28^\circ\text{C}$ est de 138 heures, contre 313 heures en 2050.

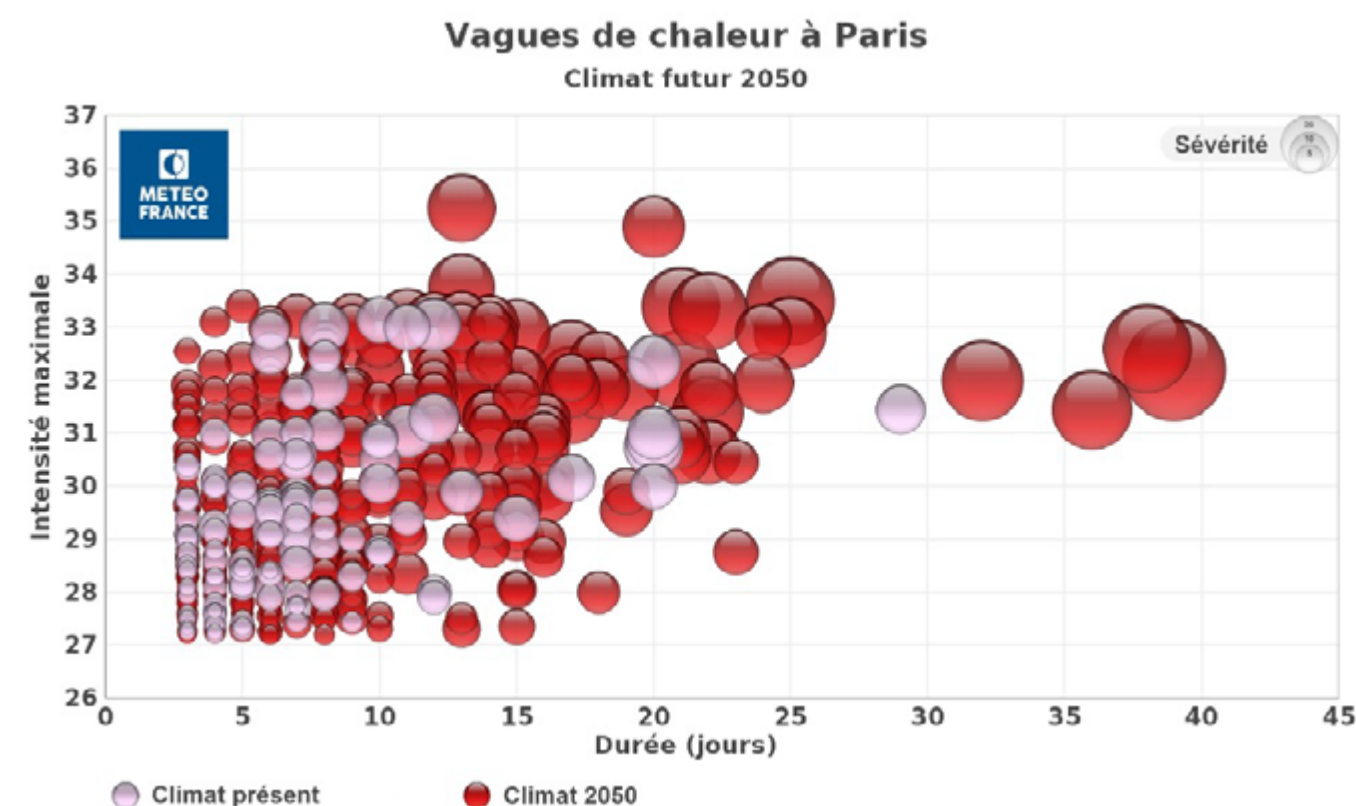


b. Des canicules plus intenses et plus fréquentes

L'analyse menée par Météo France a également porté sur les vagues de chaleur, de type canicule. Ce focus a mis en évidence l'augmentation du nombre de ces épisodes extrêmes. Leur fréquence augmente de 242% à l'horizon 2050 (484 cas identifiés sur la simulation de 200 années, soit 2,42 vagues de chaleur par an en moyenne), contre 74,5% en climat présent (149 cas identifiés sur la

simulation de référence de 200 années en climat présent, soit 0,75 vague de chaleur par an en moyenne).

L'analyse a aussi permis de mettre en évidence une augmentation en intensité et en durée à l'horizon 2050 des épisodes caniculaires (avec une moyenne plus élevée d'un jour en durée et d'un degré en intensité). Ces hausses de températures seront potentiellement accentuées en ville par le phénomène d'îlot de Chaleur Urbain (ICU).



Vagues de chaleur à Paris dans le climat présent ou sous le climat 2050 simulé selon le scénario RCP8.5.

2. Des objectifs quantitatifs pour les bâtiments

A toutes les phases de conception et à leur livraison, les ouvrages ont été mis à l'épreuve des simulations météorologiques pour anticiper le confort en 2050 et adapter le projet en conséquence. Ces simulations ont été réalisées sur la base de modélisations numériques des bâtiments, en prolongement de la démarche BIM portée par la SOLIDEO pour l'ensemble des ouvrages.

Ainsi, la SOLIDEO a-t-elle fixé, pour un grand nombre d'ouvrages, des seuils d'inconfort thermique dont les dépassements en heures doivent être limités. Des seuils différents ont été fixés par la SOLIDEO pour le climat actuel et pour le climat de 2050, anticipant ainsi que l'augmentation de la température, sous contrainte carbone, aura nécessairement pour corollaire une appréciation plus stricte de la situation d'inconfort.

L'inconfort à l'échéance 2050 correspond principalement au dépassement d'une température intérieure de 28 degrés. Pour les ouvrages olympiques, cette approche est complétée par un indicateur sur le confort ressenti, avec un inconfort défini par PMV > 1 (Predicted Mean Vote⁴). Le critère relatif au PMV permet notamment de valoriser dans la conception le recours à la ventilation naturelle ou aux brasseurs d'air lorsqu'ils sont nécessaires.

Sur les bâtiments de logement des Villages, les objectifs de confort correspondent à des seuils limites pour le nombre d'heures de l'année où la température dépasse les 28°C ou le PMV dépasse 1.

Synthèse des seuils applicables aux bâtiments de logements des Villages

	Seuil	Scénario Climatique Actuel (2000-2009)	Scénario Climatique 2050 « moyen »
PMV	> 1 (légèrement chaud)	< 110h	< 200h
Température Opérative	> 28°C	< 70h	< 160h

Les plateaux de bureaux ne sont pas soumis à ces mêmes exigences programmatiques de confort notamment en raison de la présence de rafraîchissement actif. La vérification de l'exigence de confort a été basée sur le niveau performant du référentiel HQE Tertiaire 2015, c'est-à-dire maintenir une température

résultante supérieure à 28°C pendant moins de 2% du temps d'occupation annuel.

Sur les autres ouvrages, principalement les équipements accueillant du public, les seuils pouvant correspondre à une situation d'inconfort sont fixés à 2% et 3% du temps d'occupation annuel.

contrainte sur la température opérative, pour un même bâtiment.

La méthode de la température opérative apparaît donc comme plus difficile à atteindre. Ceci reflète le fait que le confort perçu ne dépend pas que de la température opérative.

3. Des objectifs qualitatifs pour les espaces extérieurs

La démarche de confort urbain concerne également les cœurs d'îlots privés, les espaces publics et les abords des ouvrages. Les niveaux de végétalisation et les modes de gestion des eaux permettent d'y préserver des capacités de rafraîchissement des espaces et facilitent la ventilation naturelle des bâtiments voisins.

L'ambition était d'aménager les espaces extérieurs en lieux agréables, y compris lors d'épisodes de canicule ou de pics de pollution. Si la diversité des situations a complexifié la détermination de cibles quantitatives concernant le confort de ces espaces, la SOLIDEO a veillé à ce que cet aspect soit pris en compte, à travers des engagements de moyens et des démarches de simulation.

B. DES RÉSULTATS PROBANTS GRÂCE À UN SUIVI RENFORCÉ

Face à ces objectifs, des méthodes de suivi spécifiques ont été mises en œuvre, elles ont garanti la bonne atteinte des objectifs sur les différents ouvrages.

1. Un suivi continu lors de toutes les phases de projet

La méthodologie imposée par la SOLIDEO en matière de suivi des objectifs de confort constitue une réelle innovation pour la conception de projet. Pour une large majorité des ouvrages, des simulations thermiques dynamiques (STD) qualifient et quantifient les niveaux de confort. Elles ont été réalisées à chacune des étapes de conception, de l'esquisse au stade du concours ou

de l'offre, à la passation des marchés de travaux, en passant par l'ensemble des phases de conception. Ces mises à jour très régulières, bien plus que dans la conduite habituelle des projets, ont permis d'orienter les choix de conception afin d'assurer les niveaux de confort adéquats, notamment en matière d'isolation, de taux de vitrage et de protections solaires.



Les STD sur le Village des Athlètes : véritable outil de pilotage

Il a été observé que les résultats des simulations peuvent évoluer sensiblement entre les différentes phases du projet. Si certains résultats sont affichés à partir des données du DCE, ils peuvent varier durant la phase PRO lorsqu'on vient concrétiser le projet et donc modifier de manière plus ou moins importante les hypothèses. De plus, la phase EXE amène souvent des arbitrages et adaptations qui peuvent encore faire évoluer les résultats des simulations. Il a donc été important de mettre à jour les STD tout au long du projet et de s'en servir comme outil de décision pour réaliser les arbitrages et apporter si nécessaire des mesures correctives ou compensatoires. Les modifications ayant impacté le plus les résultats des simulations sont :

- Le changement de type de protections solaires. Par exemple, des systèmes d'occultation extérieurs ont parfois dû être remplacés

par des occultants intérieurs.

- Les coefficients thermiques des parois, vitrages, menuiseries peut être inconnu ou bien varier entre conception et EXE, il est nécessaire de les surveiller.
- La variation du degré d'étanchéité à l'air entre conception et réalisation peut créer un décalage très important entre les résultats des STD et les performances réelles du bâtiment.
- Pour les bâtiments tertiaires, la température à la sortie des CTA peut être différente de celle prévue initialement.

Il est donc important de conduire des études de sensibilité en phase de conception, afin d'identifier les risques de perte de confort, associés à la variation des hypothèses initiales en phase exécution. Dans le cas où les mesures ont révélé des changements notables, elles ont permis d'apporter des améliorations en recherchant des actions correctives.



Retour d'expérience sur la définition des objectifs

Les objectifs imposés par la SOLIDEO aux maîtres d'ouvrage ont été formulés de deux façons différentes, en fixant des seuils sur le nombre d'heures par an où le PMV et la température opérative dépassent des valeurs prédéfinies. Or, il s'avère que la contrainte sur le PMV est plus souvent respectée que la

contrainte sur la température opérative, pour un même bâtiment.

La méthode de la température opérative apparaît donc comme plus difficile à atteindre. Ceci reflète le fait que le confort perçu ne dépend pas que de la température opérative.

2. Des ouvrages à la pointe des conditions de confort en 2050

Sur le Village des Athlètes, le confort d'été a été étudié dans les logements et les résidences étudiantes afin de vérifier le respect des exigences programmatiques en climat actuel et en climat 2050.

Les simulations de confort d'été réalisées montrent que, quel que soit le bâtiment étudié, les exigences de confort en climat actuel sont respectées avec des dispositions passives (protections solaires, ventilation naturelle, etc.), avec néanmoins quelques variations d'un immeuble à l'autre qui traduisent l'effet de leurs caractéristiques techniques et de leur localisation. Sur le secteur Quinconces, aucune heure d'inconfort n'a été relevée pour un plot haut en superstructure béton, tandis qu'au maximum 9 heures ont été relevées dans un logement d'un plot bas en superstructure bois. Les hypothèses de gestion des apports solaires étant les mêmes pour les deux bâtiments, c'est la différence d'inertie thermique qui est ici la cause de cette variation. La mise en œuvre d'une ventilation naturelle nocturne permet, de fait, de prendre efficacement le relai de l'inertie du bâtiment en béton. Elle montre toutefois ses limites en climat caniculaire, où la température nocturne reste trop élevée pour permettre un rafraîchissement efficace et évacuer d'une journée à l'autre la chaleur stockée dans la structure.

Dans les deux cas, l'exigence est pleinement satisfaite car moins de 70 heures ont été comptabilisées pour une température résultante de plus de 28°C et moins de 110h heures l'ont été pour le PMV supérieur à 1.

A l'exception de certains bâtiments, les exigences de confort en climat 2050 «moyen» ne sont pas respectées en utilisant uniquement des dispositions passives, bien que les résultats soient en réalité souvent proches de l'objectif. Les simulations de confort d'été réalisées montrent que la mise en fonctionnement d'un plancher rafraîchissant permet de diminuer significativement les heures d'inconfort en climat 2050 «moyen» et de respecter largement l'exigence de confort thermique. Cette solution active offre de très bons résultats quel que soit le mode constructif :

- pour le bâtiment le plus défavorable en structure béton, un plot haut du secteur Quinconces, le nombre d'heures où la

température opérative résultante dépasse les 28°C est de 165 heures sans rafraîchissement contre 13 heures avec l'activation du plancher rafraîchissant (puissance maximale de froid égale à 20 W/m² et un fonctionnement de 07h à 20h).

- pour le bâtiment le plus défavorable en structure bois, un plot bas de ce même secteur, on observe un dépassement de 99 heures sans rafraîchissement et de 17 heures avec l'activation du plancher rafraîchissant (puissance maximale de froid égale à 15 W/m² et un fonctionnement de 07h à 20h). La mise en fonctionnement d'une solution active s'avère également pertinente pour le critère du PMV en limitant au maximum à 20 heures pendant lesquelles l'inconfort ressenti dépasse 1, là où l'objectif est de le limiter à moins de 200 heures.

Le confort a également été étudié sur les plateaux de bureaux afin de vérifier que le système de rafraîchissement prévu permet d'assurer un confort optimal. Sur le secteur Quinconces, le bâtiment de bureau atteint un niveau de confort conforme au niveau très performant du référentiel HQE 2015.

Les équipements publics obtiennent également de bons résultats. Le groupe scolaire de Dugny, compte moins de 3% d'inconfort pour le climat 2050. Cela représente une vingtaine d'heure par an où la température à l'intérieur des classes est supérieure à 28°C. L'opération de réhabilitation lourde du gymnase Pablo Neruda comprenant notamment la reprise de toute l'enveloppe du bâtiment permet l'atteinte de très bons résultats de confort : avec moins de 10h d'inconfort à horizon 2050. Les grands sites sportifs de compétition : l'Arena de la Porte de la Chapelle ou l'Arena de Bercy disposent de moyens de rafraîchissement actifs bas-carbone permettant d'atteindre des objectifs de confort beaucoup plus drastiques imposés par les fédérations sportives.

MOINS DE

20h

d'inconfort en 2050 dans les logements du Village des Athlètes grâce à l'activation du plancher rafraîchissant

C. LE VILLAGE DES ATHLÈTES, UN EXEMPLE : DU DESSIN URBAIN JUSQU'À LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS

Les enjeux d'adaptation du projet au climat de 2050 ont présidé à la réflexion sur la morphologie des projets tant à l'échelle du quartier qu'à celle de chaque bâtiment.

1. Morphologie urbaine et simulations à l'échelle du quartier

La question du confort a guidé le travail des concepteurs dès le dessin urbain du Village des Athlètes, à travers la segmentation du projet en îlots et les prescriptions attachées à chacun de ces îlots, relatives à la forme et la hauteur des bâtiments.

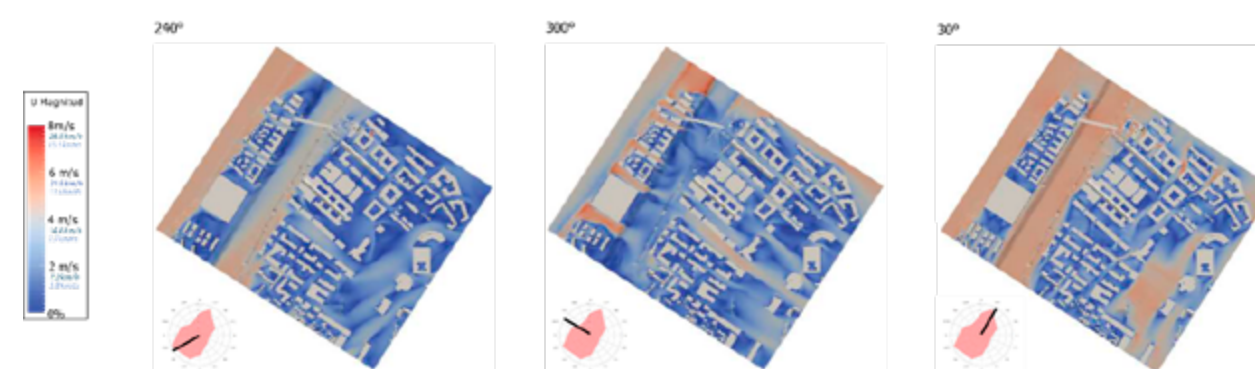
La démarche de conception bioclimatique s'illustre ainsi dans la morphologie urbaine du Village des Athlètes. L'orientation des axes publics internes au quartier instaure une dualité vis-à-vis de l'ensoleillement : un côté ensoleillé agréable pour la promenade au printemps et un côté ombragé et frais faisant office de réserve de fraîcheur l'été.

La conception des « îlots bateaux » s'inscrit également dans cette logique et atténue l'ensoleillement. A Saint-Ouen, les îlots se composent d'immeubles en plots, qui ont fait l'objet de modélisations aérodynamiques et d'études d'ensoleillement et se montrent très

efficaces d'un point de vue environnemental. Cette configuration établit un bon compromis entre compacité, ensoleillement et vues multiples, tout en assurant la ventilation du quartier mais en limitant l'inconfort aérodynamique.

En appui de la conception, des simulations ont été réalisées afin d'évaluer la pertinence des orientations au regard des bénéfices attendus en matière de ventilation naturelle du quartier ou d'ensoleillement des bâtiments et des espaces publics.

Sur le Village des Athlètes, ces simulations ont permis de valider la pertinence du recours à la forme de plots de différentes hauteurs, notamment en matière d'ensoleillement. Pour ce qui concerne l'aérodynamique, les études ont mis en évidence la prédominance de vents en provenance de la Seine capables - grâce à la forme et à l'orientation des îlots - de rafraîchir l'ensemble du quartier.



Modélisation des couloirs de rafraîchissement

2. Une conception bioclimatique des bâtiments

Les STD ont mis en évidence que les principaux facteurs qui déterminent les performances des immeubles du Village des Athlètes se divisent en deux catégories :

- Les facteurs relevant des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment ;
- Les facteurs relevant des caractéristiques des espaces habités et des logements en particulier.

Ainsi, chaque immeuble a fait l'objet de choix de conception et de réalisation dont les effets sur le confort d'été peuvent devenir visibles à différentes temporalités du projet. Il est donc important de prendre en compte, dès la phase de conception, les dimensions suivantes :

- **Matériaux de construction** : les bâtiments en béton ont une inertie thermique supérieure au bois, ce qui permet de lisser dans le temps les pics de température intérieure dus à l'exposition solaire. Le revers de la médaille est lié au fait que cette même inertie ralentit la baisse de température durant la nuit.

- **Étanchéité à l'air** : nous avons observé qu'une différence notable peut être constatée entre les valeurs d'étanchéité simulée d'un bâtiment et les mesures réalisées à la livraison, des imperfections peu visibles comme lors de la pose de joints sur les coffrets techniques entraînant des conséquences importantes sur l'étanchéité. La dégradation de l'étanchéité à l'air a pourtant un impact significatif sur les besoins de chauffage et les besoins de froid. Le débit et le type de ventilation (simple flux ou double flux) ont également un impact très important. Aussi, les réglages des débits de ventilation mécanique forcée (VMC) dépendent généralement de l'humidité de l'air et, si une augmentation se produit lors d'un pic de chaleur, ceci peut impacter négativement la performance du bâtiment.

- **Taille du bâtiment** : plus un bâtiment est grand, plus il va avoir une inertie importante. Il va donc accumuler de la chaleur et de la fraîcheur. On observe ainsi un déphasage entre la température extérieure et intérieure, qui en été ne redescend pas immédiatement, en particulier en période de canicule.



La surface extérieure du bâtiment E1a_1 impacte ses performances

- **Forme du bâtiment** : en fonction du geste architectural, le bâtiment peut avoir des surfaces extérieures plus importantes à volume constant, ce qui provoque des échanges thermiques supérieurs.

- **Isolant** : l'utilisation d'un isolant performant et englobant améliore les performances d'un bâtiment, plus ou moins sensiblement en fonction du matériau de construction et des caractéristiques de l'isolation. La démarche d'innovation menée a permis d'expérimenter de nouvelles méthodes : avec une façade en bois et de la laine de bois en isolant, on a pu obtenir la même performance d'isolation qu'une façade béton avec isolation en laine de roche. Cependant, le choix du bois impose d'empiler une multitude de couches (lames d'air, pare vapes, écrans thermiques, ...), qui peuvent subir des dégradations en cas d'écarts de température extérieure-intérieure trop importants, par exemple dus à de la

climatisation. Ceci est particulièrement vrai si les écarts se produisent sur de longues périodes, en présence de forte humidité.

Le cas du Village des Athlètes est intéressant car les bâtiments respectent les objectifs de confort malgré des différences de forme, de taille des bâtiments et des modes constructifs : bois ou béton. Des prescriptions ambitieuses sur certains paramètres ont joué sur l'atteinte de ces résultats. L'isolation par l'intérieur a été proscrite et seules les solutions d'isolation répartie ou d'isolation par l'extérieur ont été autorisées.

Un seuil d'étanchéité à l'air de $n_{50} \leq 0,6$ Vol/h a également été imposé, il s'agit ici d'un objectif tiré de la construction passive, bien plus exigeant que ce qui est imposé par la réglementation thermique. Les tests menés à la réception montrent que l'objectif fixé par le CPEE d'un $n_{50} < 0.60$ vol/h n'est pas atteint sur l'ensemble des bâtiments du Village des Athlètes : les résultats varient de 0.57 à 3,05 Vol/h en réception phase JOP. Les défauts d'étanchéité à l'air, principalement sur des éléments de second œuvre, constituent à ce stade un point d'attention majeur. Il a été demandé sur la base de ces tests, de définir une méthodologie pour régulariser les

défauts d'étanchéité et assurer le suivi des mesures correctives lors de la réversibilité des logements. Les interventions permettant de corriger ces défauts sont souvent minimes : mise en place des joints manquants, réglage des menuiseries, reprise des calfeutrements de réseaux etc. Cette méthodologie devra également couvrir les logements qui n'ont pas été testés. De nouveaux tests sont attendus en phase héritage.

Par ailleurs, dans le cadre du retour d'expérience, il apparaît assez nettement que l'objectif du $n_{50} < 0.60$ vol/h était difficilement atteignable pour des projets de logement en ventilation simple flux. La présentation des résultats d'étanchéité à l'air sous l'indicateur n_{50} (vol/h) (qui est défini comme le débit de fuite d'air sous une pression différentielle de 50 Pa rapporté au volume chauffé) a également fait l'objet de nombreux échanges avec les promoteurs du Village qui sont habitués à l'exprimer en Q_4 ($m^3 / (h.m)$) (défini comme le débit de fuite d'air sous une pression différentielle de 4 Pa rapporté à la surface de parois déperditives). Le Q_4 est classiquement l'indicateur le plus « utilisé ». Il caractérise la qualité de l'étanchéité mais ne prend pas en compte l'effet de la compacité du bâtiment.

3. Les caractéristiques des logements : leviers de confort

La conception des immeubles a été réalisée en arbitrant entre facteurs programmatiques, économiques, écologiques et de confort d'usage. Parmi les principaux facteurs influençant le confort d'été, les simulations ont notamment identifié :

- **L'orientation** : les logements situés sur les pignons ouest et sud sont parmi ceux qui se retrouvent souvent défavorisés. Aussi, certains espaces d'angle bi-orientés peuvent subir un ensoleillement important à différents moments de la journée, ce qui en période de canicule provoque une accumulation de chaleur. D'un point de vue quantitatif, la variabilité du confort d'été d'un logement à l'autre peut être importante. Une campagne de mesures réalisée, après sa construction,

sur un bâtiment du Village durant une vague de chaleur a montré des écarts entre la température extérieure et intérieure allant de 4,5 à 8,8 °C, selon les logements. Cependant, les simulations portant sur le climat 2050 extrême nuancent ce résultat car, en cas de chaleur extrême, les logements présentent des taux d'inconfort similaires quelle que soit leur orientation.

- **Le caractère traversant** : plus globalement, on remarque une véritable différence entre logements traversant et non, par la ventilation naturelle qui est accentuée dans le premier cas. A titre d'exemple, les figures ci-dessous montrent la moyenne des températures (courbe bleue) calculées pour les cinq jours les plus chauds de l'année, pour un logement

traversant (à droite) et non (à gauche). On voit que les températures sont inférieures, voire sensiblement inférieures pour le logement traversant, sur toute la durée étudiée.

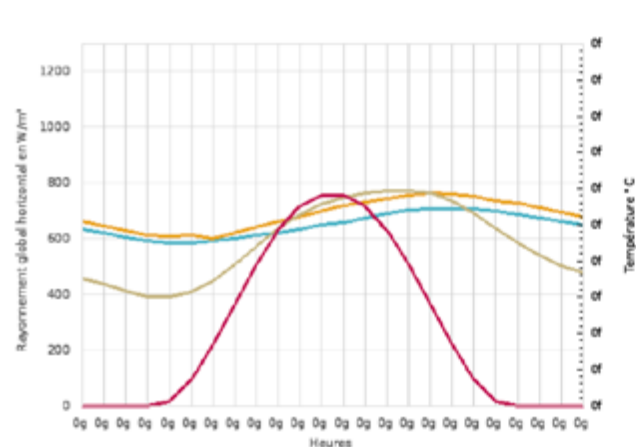
• **les ombres portées** : la présence d'autres bâtiments autour crée une barrière au rayonnement solaire, réduisant les apports. Par ailleurs, ceci provoque indirectement une corrélation entre hauteur du bâtiment ou étage du logement considéré et performances. Les étages hauts sont plus exposés au soleil, alors que les plus bas bénéficient de l'ombrage des bâtiments autour ;

• **le taux de vitrage et les protections solaires installées** : les persiennes (extérieures) assurent un meilleur confort d'été que les stores (intérieures). Les volets roulants permettent de limiter les déperditions de chaleur en hiver, alors que les brise soleil orientables ne le permettent pas ;

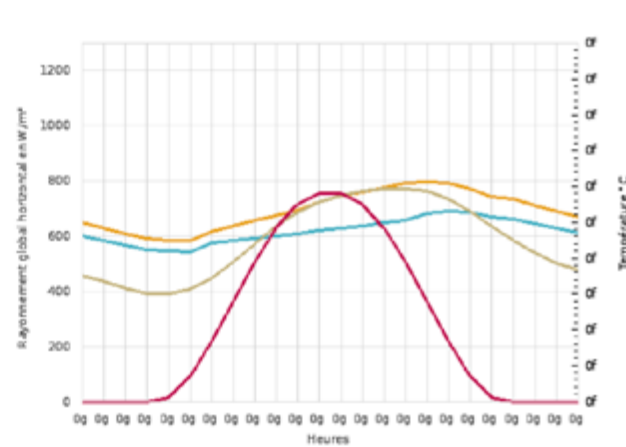
• **la taille du logement** : plus les logements sont grands, moins l'impact des apports internes de chaleur, comme ceux venant de la cuisine, est important en proportion.

Ainsi, considérant ces paramètres, plusieurs grands principes ont été appliqués sur le Village des Athlètes. Les plans traversants ou bi-orientés ont été généralisés sur les logements à partir du T2. Un objectif de ratio de surface vitrée à 30% pour les logements et 40% pour les bureaux a été fixé. Ces taux ont été maîtrisés sur le Village des Athlètes et atteignent autour de 25% pour les logements, avec des vitrages dont le facteur solaire a été limité ($S_g = 0,51$ à $0,56$). Pour les bureaux, la surface vitrée étant plus importante, des matériaux avec des facteurs solaires plus faibles ($S_g = 0,38$) ont été privilégiés. Les bâtiments sont souvent équipés de protections solaires. Les logements sont équipés de différents systèmes adaptés aux façades : volets roulants, persiennes, stores extérieurs ou brise-soleil orientables. Seules certaines façades de bureaux sont équipées de stores intérieurs, dispositifs les moins performants en termes de protection solaire, mais compensé par des vitrages limitant les surchauffes.

La ventilation naturelle également été poussée partout où cela a été possible et notamment dans certaines cages d'escalier.



TIC d'un logement non traversant



TIC d'un logement traversant

— Rayonnement direct nominal
— Température opérative TIC
— Température Tref
— Température extérieure

4. Le réseau de froid indispensable à l'atteinte des objectifs

La réalisation du Village des Athlètes, à Saint-Denis et Saint-Ouen, en parallèle de l'extension du réseau de chaleur du SMIREC sur le territoire de Plaine Commune, a suscité la création d'un réseau froid pour le secteur Pleyel, dont la production est principalement assurée par la pompe à chaleur installée dans la centrale de géothermie du Village. Celle-ci permet la production de chaleur et de froid au cours du même cycle thermodynamique et la récupération de la chaleur produite pour l'eau chaude sanitaire. Le projet initial ne comprenait que le raccordement des bureaux au réseau de froid.

Si le confort sous le climat actuel est entièrement atteint à partir des dispositions passives, les simulations thermiques dynamiques menées sur les logements en configuration héritage ont mis en évidence la difficulté à atteindre le confort en 2050 uniquement avec des dispositions passives.

Dans un premier temps, la SOLIDEO et le SMIREC ont donc étudié l'opportunité d'un raccordement futur des programmes de logements au réseau de froid, à l'horizon 2030 ou 2040 et, dès-à-présent, l'installation de planchers réversibles (chauffants et rafraîchissants) dans les logements, en dimensionnant

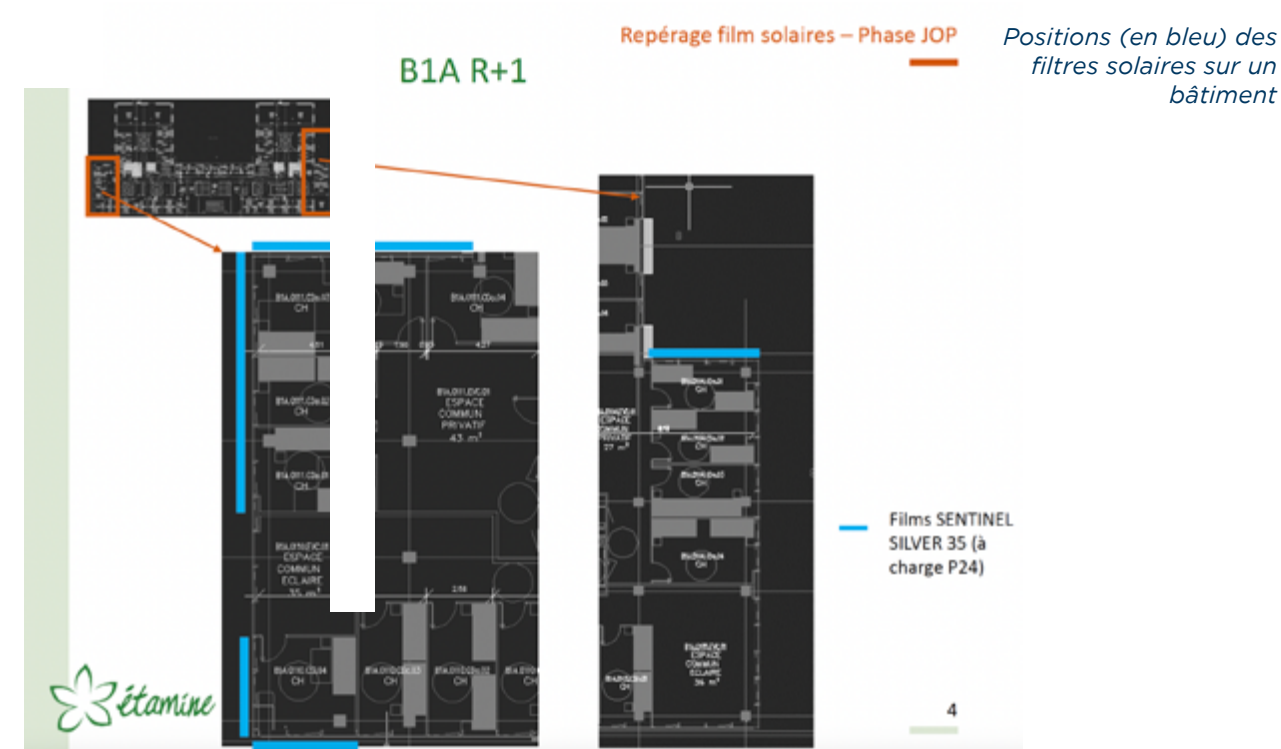
les réseaux en conséquence mais sans raccordement et modification du dimensionnement des installations de production.

Toutefois, deux spécificités relatives à l'usage des logements en phase Jeux ont conduit à un raccordement des logements au réseau de froid dès 2024 :

- la « suroccupation » des locaux, avec l'ajout de cloisons temporaires, qui entraîne une augmentation importante des apports de chaleur internes (liés au corps humain en l'occurrence) et donc complexifie l'atteinte des niveaux de confort dans les logements ;

- la spécificité des objectifs de confort fixés pour les athlètes, plus contraignants qu'en phase héritage, avec une température inférieure à 26°C lorsque la température extérieure est inférieure à 32°C et un écart minimal de 6°C entre l'extérieur et l'intérieur dès lors que la température extérieure dépasse 32°C.

Les simulations ont montré que ces critères de confort définis pour les athlètes entraînaient, dans de très nombreux logements, le besoin de mesures complémentaires, comme l'installation de films solaires sur les pièces bi-orientées, ou des apports de froid.



Malgré l'application de cette mesure, les calculs ont montré qu'en climat caniculaire, 20 % des lits environ rencontreraient des températures supérieures à la limite d'inconfort.

En anticipation d'une action qui apparaît inéluctable à l'horizon 2050, afin de limiter le recours à des équipements individuels plus polluants et émetteurs de chaleur dans l'espace public, la SOLIDEO, en accord avec les collectivités locales, a pris la décision de réaliser, dès 2024, le raccordement de l'ensemble des logements de la ZAC Village Olympique et Paralympique au réseau de froid. Ce raccordement de programmes de logements à un réseau de froid constitue une première à l'échelle nationale. La SOLIDEO met ainsi un outil de résilience climatique innovant à la disposition de la collectivité, avec l'objectif de limiter au maximum un

potentiel effet rebond tout en apportant dès 2025 aux habitants du quartier une source de rafraîchissement vertueuse.

L'intérêt de la démarche réside dans sa capacité à apporter un niveau de confort très satisfaisant tout en limitant fortement la dépense énergétique, notamment par rapport à la climatisation. En effet, le rafraîchissement actif proposé sur le Village pourra développer une puissance de 16 à 20 W/m² contre autour de 100 W/m² pour de la climatisation classique. S'agissant de rafraîchissement, il ne permettra pas d'atteindre une température de consigne quelle que soit la température extérieure, mais contribuera à remédier à la plupart des situations d'inconfort.

Installation du plancher réversible



5. La simulation 3D : outil de vérification de la performance

Afin de conforter sa stratégie en termes de confort urbain et en mesurer l'efficacité, la SOLIDEO a réalisé des simulations approfondies d'un étage d'un des immeubles du Village des Athlètes, en complément des simulations thermiques dynamiques. Une collaboration a été mise en place avec Dassault Systèmes, entreprise leader dans la simulation et le rendu 3D, avec la participation du promoteur ICADE. Le but était d'avoir une simulation complémentaire et un rendu le plus

pédagogique possible sur les performances futures des bâtiments.

Un travail a donc été réalisé, en s'appuyant sur la maquette BIM du Village des Athlètes, pour simuler le comportement thermique des logements en phase Jeux, afin d'en visualiser d'un coup d'œil les conditions de confort. Ceci, de manière à voir, en avance de phase, ce qui pourrait se produire pour chaque logement et en fonction de différents scénarios climatiques futurs.

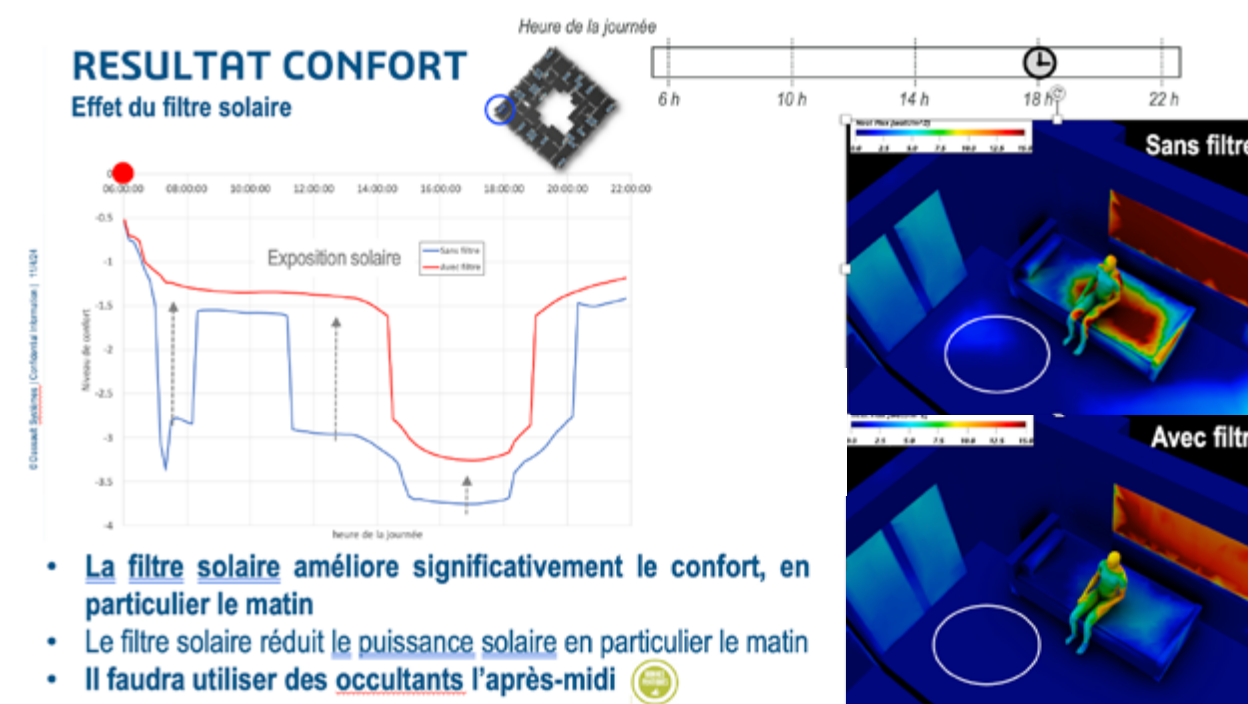
Le logiciel de simulation a été utilisé pour étudier le comportement du bâtiment, en le situant dans son contexte. Des facteurs externes comme le vent, la température de l'air, l'hygrométrie et l'ensoleillement ont été pris en compte, tout aussi bien que les effets de la conception bioclimatique du Village et des ombres portées par les autres bâtiments. La simulation s'est appuyée sur les fichiers climatiques produits par Météo France, dans le scénario extrême de 2050 et en étudiant notamment le cas de canicules sur plusieurs jours, afin d'envisager le pire scénario possible. S'appuyant sur les données fournies par la SOLIDEO et ses partenaires du secteur de la construction, Dassault Systèmes a utilisé son logiciel SIMULIA pour : créer le modèle 3D de l'étage supérieur de l'un des bâtiments, modéliser des paramètres tels que l'isolation, la ventilation, les stores et l'activation du plancher rafraîchissant, ainsi que calculer la température intérieure tout au long de la journée.

Ces simulations ont permis à la SOLIDEO de confirmer les effets de chacun de ces paramètres, ainsi que la manière dont le bâtiment, tel qu'il a été conçu, pourra optimiser le niveau de confort intérieur à différents moments de la journée sans qu'il

soit nécessaire de recourir à des solutions structurelles supplémentaires. En outre, ces simulations ont démontré l'efficacité des stores en fonction de leur position et de l'heure de la journée, ainsi que celle des planchers rafraîchissants qui seront posés.

La simulation illustre dynamiquement l'effet de différents facteurs sur la température au sein du bâtiment. Elle constitue un outil pédagogique pouvant être fourni aux futurs gestionnaires du bâtiment, afin de leur permettre d'adopter une stratégie adéquate (effet de la ventilation naturelle, de l'installation de filtres solaires...).

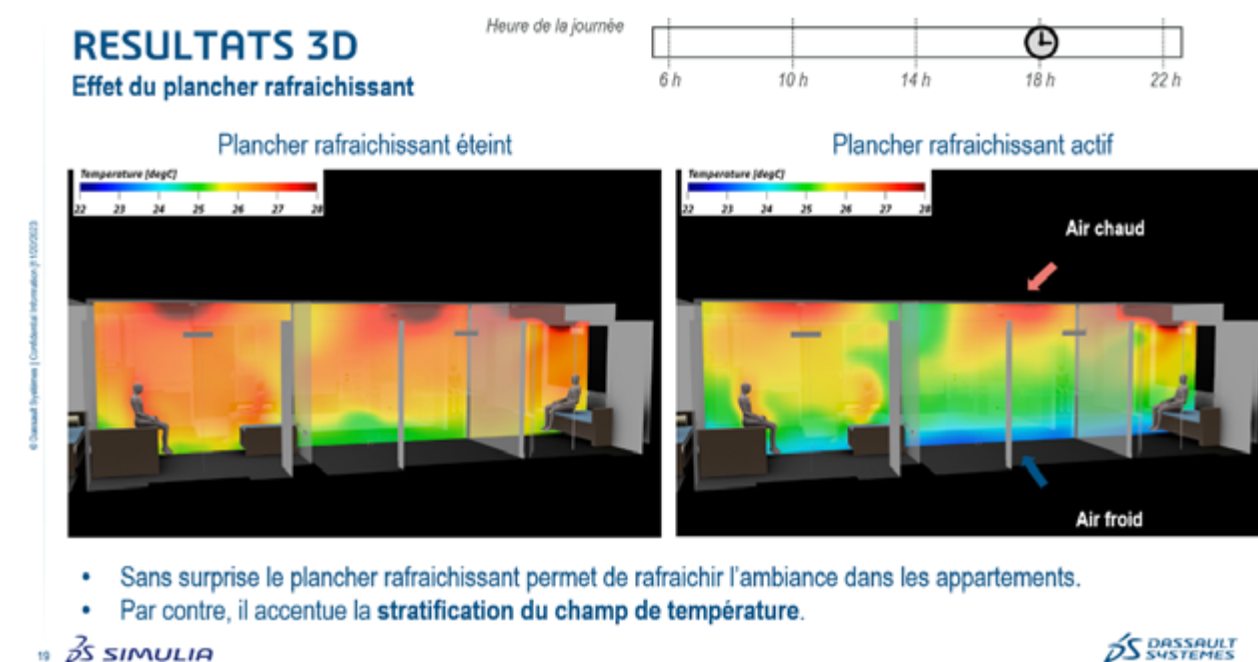
L'étude comprend également la modélisation du confort d'une personne se trouvant dans le bâtiment et les effets de différents facteurs : ensoleillement, en fonction du moment de la journée et de la position de la personne dans la pièce, effet du mobilier sur le fonctionnement du plancher rafraîchissant, effet de l'application de mesures d'amélioration du confort (filtre solaire),... Elle donne ainsi de précieuses indications sur la future exploitation optimale du bâtiment et une information qui se rapproche de l'objectif de la méthode PMV, plutôt que la température opérationnelle comme seul critère de confort.



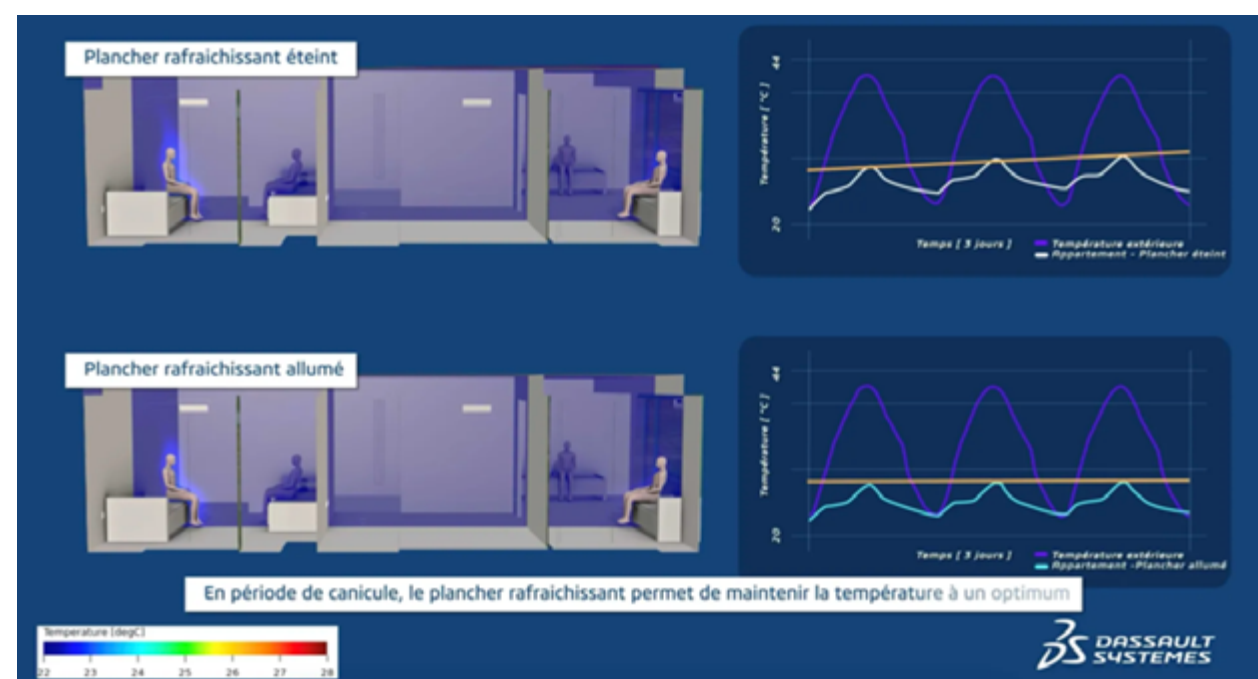
Effet du rayonnement solaire sur le confort des occupants et stratégie de gestion

La simulation montre qu'en conditions de canicule (chaleur élevée se propageant sur plusieurs jours et nuits consécutives), à défaut d'activer le plancher rafraichissant, la chaleur s'accumule et on observe une augmentation progressive de la température intérieure, jusqu'à dépasser la différence d'au moins 6°C entre extérieur et intérieur imposée. En revanche, l'activation du plancher rafraichissant

permet de compenser l'accumulation de chaleur venant du rayonnement solaire et de la température extérieure et de respecter l'objectif. La simulation ayant été réalisée sur les trois jours les plus chauds du mois d'août 2050, selon le scénario extrême prévu par météo France, elle permet de se rassurer également sur le confort d'usage des bâtiments en phase héritage.



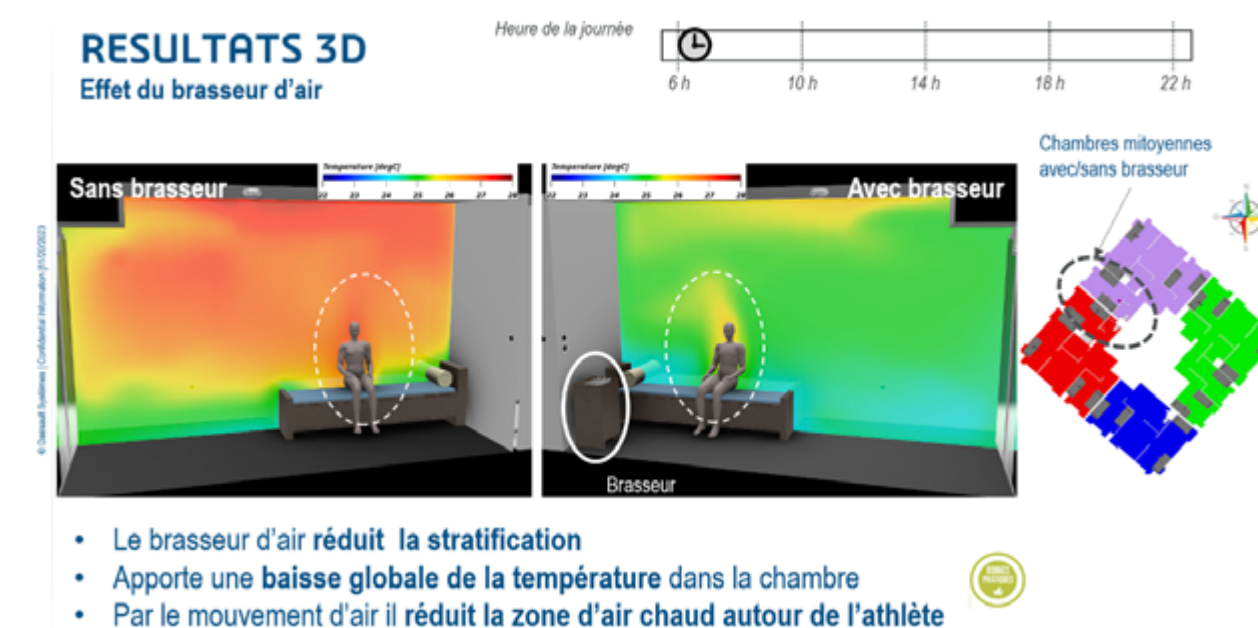
Effet du plancher rafraichissant au plus chaud de l'été 2050 (scénario extrême Météo France)



Effets de l'accumulation de chaleur après 3 jours de canicule en fonction des stratégies de rafraichissement

Un phénomène qui n'avait pas été pris en compte dans les simulations thermiques est mis en évidence grâce à la simulation : l'air froid reste près du sol, en créant une stratification inconfortable et en empêchant

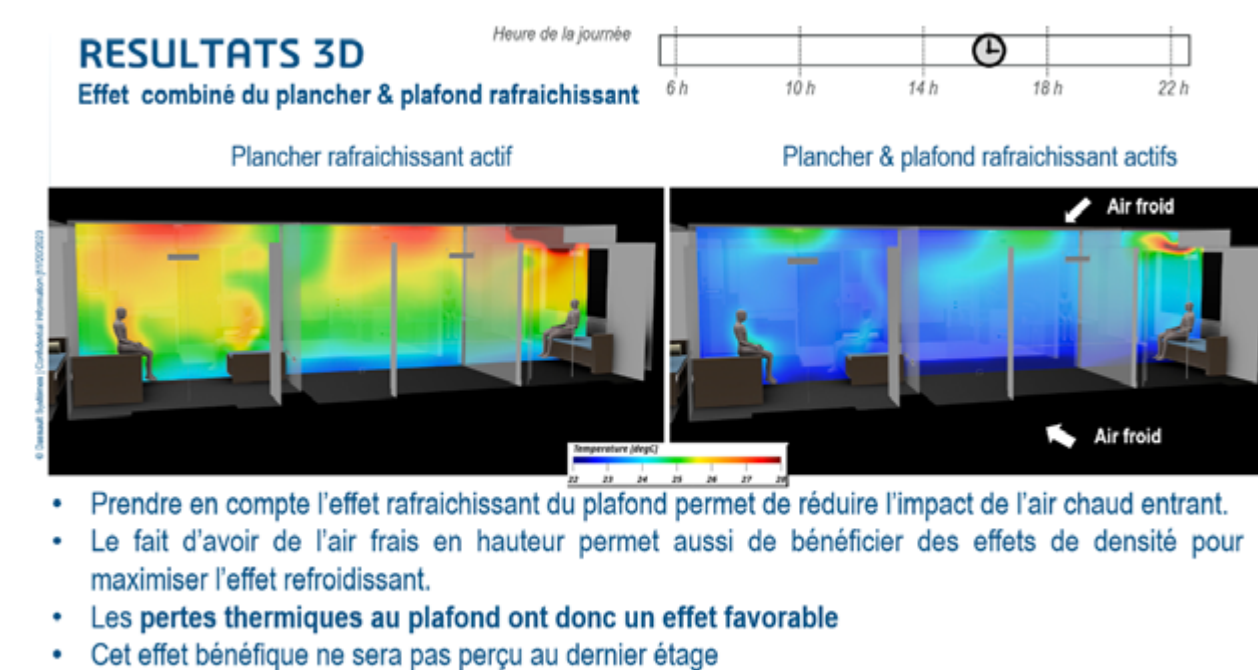
parfois un rafraichissement optimal. La simple installation d'un brasseur d'air permet de réduire ce phénomène et contribue de manière notable au rafraichissement des pièces.



Effet bénéfique du brasseur d'air sur l'efficacité du plancher rafraichissant

La simulation a également mis en évidence l'effet de fraîcheur généré par le plancher rafraichissant de l'étage supérieur et l'importance de bien prendre en compte

l'effet des matériaux constituant les planchers sur ce phénomène (différence de conduction thermique entre les planchers bois et béton notamment).



Effet du plancher rafraichissant de l'étage supérieur en cas de plancher en béton

Grâce à cette étude, les futurs exploitants des bâtiments bénéficient d'informations clés pour optimiser le confort intérieur, même en cas de fortes températures extérieures. La simulation effectuée par Dassault Systèmes confirme que le soin particulier apporté à la

conception des bâtiments de logements et de bureaux ainsi qu'aux équipements permettra d'offrir aux futurs habitants et usagers des niveaux de confort importants, y compris en période caniculaire.

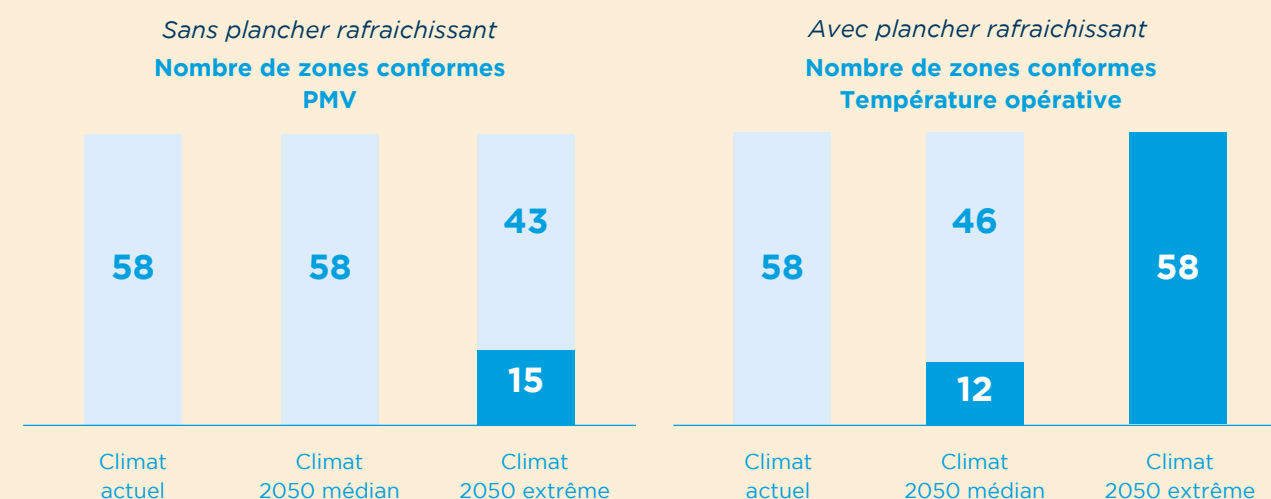


La simulation pour anticiper les besoins en froid

En combinant les simulations thermodynamiques réalisées tout au long du projet par les promoteurs et l'étude ponctuelle réalisée avec Dassault Systèmes, pour l'ensemble des projets, on observe que les conditions de confort d'été sont respectées, à l'exception de quelques objets et espaces qui présentent des dérives de températures en cas de canicule.

Sur les logements en configuration héritage, l'apport de froid complémentaire avec une

puissance de 20 W/m² permettrait de rapporter l'ensemble des logements sous les seuils d'inconfort et même de réduire à presque zéro le nombre d'heures de dépassement de 28°C sous le climat de 2050. Un exemple est donné par la figure ci-dessous, qui montre que le plancher rafraichissant permet de rendre confortables tous les logements d'un immeuble, alors même qu'aucun ne respecterait les conditions de confort dans le climat 2050 extrême, sans rafraichissement actif.



Il faut cependant noter que, selon les simulations, de nombreux bâtiments, voire la majorité, auraient besoin d'actionner les planchers rafraichissants en climat 2050 extrême. Les puissances maximales de froid seraient atteintes avant de satisfaire ce besoin cumulé. La puissance et la capacité du réseau de froid devront donc évoluer dans le temps, en fonction du niveau de confort souhaité. Par ailleurs, les besoins ont déjà évolué entre la phase de conception et de réalisation des bâtiments, ce qui a demandé de revoir les accords avec le fournisseur d'énergie.

Il est important de souligner que le parti pris n'a pas été de dimensionner le réseau de froid à partir de la modélisation d'une année caniculaire sous le climat de 2050, mais d'un été moyen de 2050. L'hypothèse est que le gestionnaire pourra adopter des stratégies de résilience adaptées à différents contextes sur la base des installations existantes, par exemple en variant les régimes de température du liquide caloporteur ou en s'appuyant davantage sur les espaces refuges.

Quoi qu'il en soit, le réseau a été conçu pour qu'il puisse connaître une deuxième étape de développement, en augmentant les puissances de froid.

6. Des espaces refuges dans les bâtiments et les équipements

La SOLIDEO a recherché, pour les ouvrages olympiques, des réponses aux enjeux d'épisodes caniculaires, plus fréquents, plus longs et plus chauds (en température moyenne) que la canicule de 2003. Il ne s'agit alors plus de confort mais bien de résilience. Les espaces refuges sont des lieux facilement identifiables, ouverts ou fermés, adaptés à l'accueil du public. Ils peuvent présenter des caractéristiques telles que l'autonomie électrique grâce à des groupes électrogènes, des espaces rafraichis pour les personnes vulnérables et permettent le rassemblement des populations lors de situations de crises diverses.

Les prescriptions initiales de la SOLIDEO prévoyaient ces espaces refuges dans les bâtiments de logements et de bureaux, sous la forme d'espaces communs équipés, mais également au sein des équipements publics et, en extérieur, sur les espaces publics.

La sanctuarisation d'espaces communs au sein des bureaux et logements n'a pas toujours été possible en raison des contraintes de compacité des bâtiments. Toutefois, les projets apportent des réponses partielles, avec l'équipement en eau d'espaces communs tels que des halls d'entrée ou des espaces de

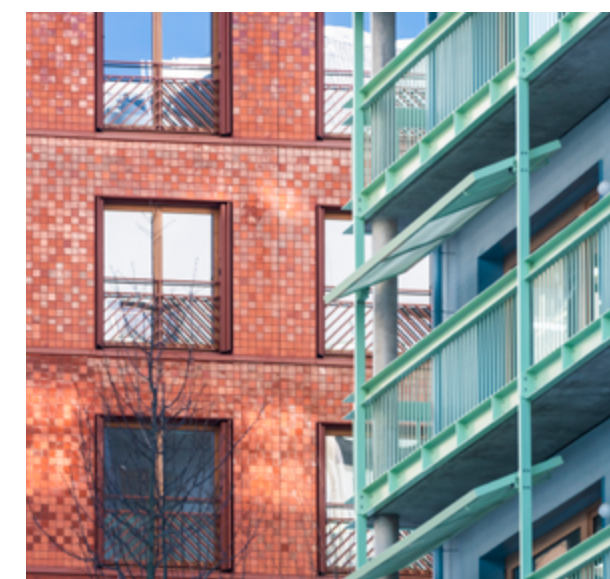
circulation. Ces espaces restent modestes et leur équipement en général peu développé, pour des raisons de gestion. La conception a cependant esquissé une première brique de réponse que les futurs occupants et gestionnaires pourront renforcer.

Les équipements publics, dotés de systèmes de rafraichissement passifs et actifs, joueront principalement le rôle d'espace refuge. Par exemple, le groupe scolaire de Dugny, dans le Village des Médias, intègre ainsi des brise-soleils orientables, permettant d'obtenir un taux d'occultation de 90% en position fermée et de participer à un haut niveau de confort en situation chaude ou caniculaire. Le projet assure à tous les locaux un taux d'inconfort inférieur à 2% du temps d'occupation sous le climat projeté de 2050.

Les collectivités, dans le cadre de leurs plans canicule, assurent la gestion de ces zones refuges qui sont souvent situées dans les dortoirs, les salles polyvalentes des groupes scolaires ou dans les gymnases. Elles peuvent ainsi profiter des caractéristiques de confort des bâtiments et les compléter aisément par des systèmes de rafraichissement actif permettant de ne pas dépasser 26°C maximum sous le climat projeté de 2050.

7. Accompagner les usages

Les performances de confort de bâtiments non climatisés dépendent fortement de leur usage. À titre d'exemple, la préservation de la fraîcheur du bâtiment en période chaude dépend fortement de la fermeture des protections solaires pendant la journée, en particulier lorsque les apports solaires sont directs, ou de l'ouverture des menuiseries la nuit, lorsque la température extérieure baisse. Pour obtenir les meilleures performances, il faudrait par exemple fermer les volets à 85 % durant la journée en été et ouvrir les fenêtres de tous les séjours et chambres pendant la soirée et la nuit, jusqu'à 6 mois par an sous certaines conditions. Ces exemples montrent qu'on anticipe là des comportements de la part des occupants des logements qui sont encore aujourd'hui loin d'être généralisés.



Brise-soleil sur le Village des Athlètes

D. DES SYSTÈMES COMPLEXES POUR ASSURER LE CONFORT DANS LES SITES SPORTIFS

La gestion du confort dans les sites sportifs est très complexe car elle doit prendre en compte les besoins qui peuvent varier selon les sports mais également les caractéristiques spécifiques de ces grands volumes.

1. L'Arena Porte de la Chapelle : le choix du meilleur compromis

L'Arena de la Porte de la Chapelle présente des caractéristiques spécifiques : multiples activités hébergées (sport de ballons, sport de raquettes, concerts, etc.), multiples espaces, grande volumétrie, importante hauteur sous plafond et occupation fortement variable. Des objectifs spécifiques de confort ont été définis, en particulier un plafond annuel fixé à 3% d'heures d'inconfort sur la période d'occupation pour une année caniculaire, ainsi que des objectifs d'éclairage naturel en fonction des typologies d'espace.

Le calage de tous les paramètres de confort visuel et thermique a nécessité des itérations continues en phase de conception pour trouver le meilleur compromis en respectant les exigences programmatiques.

Des principes de conception passive et bioclimatiques ont ainsi été appliqués en phase de conception en suivant l'ordre ci-dessous, dans une perspective de sobriété :

- limiter la surface vitrée : le projet atteint globalement 22% de surface vitrée ;
- favoriser les vitrages sur les façades Nord et Sud, 20% des baies vitrées sont placées en face sud ;
- mettre en œuvre des occultations extérieures

sur les façades exposées : sous la forme de casquettes protectrices dans le prolongement des terrasses pour créer des zones d'ombres et grâce à des systèmes de stores bannes ou stores toiles extérieures ;

- mettre en œuvre des vitrages à contrôle solaire : en utilisant une des meilleures références du marché avec un facteur solaire très bas ($S_g = 0,33$).

D'autres leviers concernant la performance de l'enveloppe et la végétalisation des toitures ont également été activés. Toutes ces dispositions passives ont permis d'atteindre les objectifs de confort dans les espaces concernés : les gymnases, etc. La grande salle est quant à elle rafraîchit via le réseau de froid urbain. Ce rafraîchissement actif permet d'atteindre les températures imposées par les cahiers des charges pour les concerts et compétitions sportives, notamment en cas de forte occupation. La conception du système de ventilation et de rafraîchissement en phase étude avait fait l'objet d'une attention particulière, avec la réalisation d'une simulation aérodynamique et thermique pour vérifier que les conditions de confort étaient atteintes partout dans la salle, mais également que les flux d'air générés par la ventilation respectaient les normes sévères imposées par la pratique du badminton.

2. Le Grand Palais : compenser l'effet de serre

Les travaux de rénovation de la Nef du Grand Palais devaient répondre au défi d'améliorer la thermie de ce volume de 450 000 m³. L'effet de serre généré par la présence de la verrière est ainsi très conséquent : pour une température extérieure de 30°C, on relève ainsi 37,5°C au sol et jusqu'à 50°C sous la verrière. Il est impensable de contrôler la température d'un tel volume mais l'objectif du projet était de

réguler la température sur les deux premiers mètres de hauteur. Pour cela, plusieurs options de travaux ont été étudiées et validées grâce à une simulation en dynamique des fluides :

- La mise en place d'une dalle active. Après la démolition de l'ancienne dalle, le terrain a été remodelé avant d'y installer un isolant thermique. 46km de tubes caloriporateurs ont été

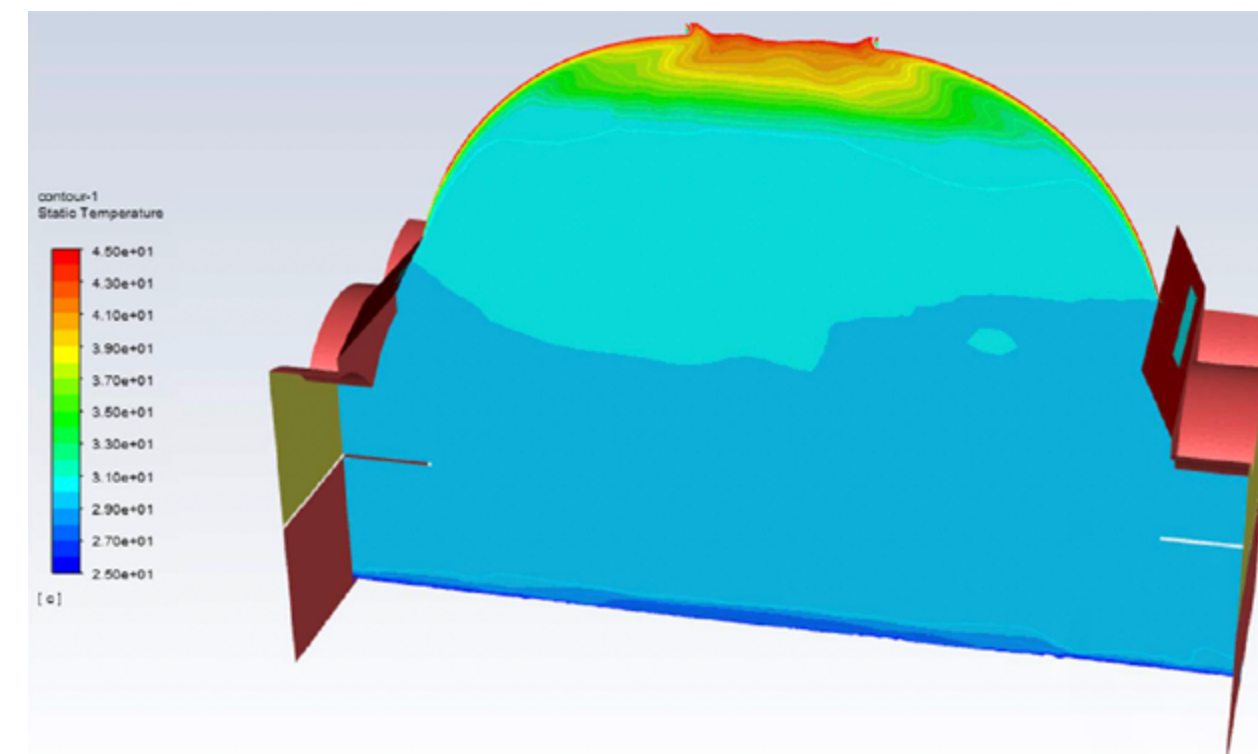
posés permettant de faire circuler un fluide à 50°C maximum en hiver et 15°C en été. Le dispositif est raccordé au réseau de chaleur et de froid de la Ville de Paris.

- L'amélioration de la ventilation naturelle grâce à l'installation de closoirs qui permet l'ouverture de 150m² sur la verrière et ainsi l'évacuation de l'air chaud stagnant en haut de la Nef.

- L'installation de filtres solaires sur les vitrages.

L'ensemble de ces mesures ont été modélisées par cette étude et démontrent l'atteinte d'une température de 30,5°C au sol et au niveau des balcons soit une amélioration de 7°C.

Modélisation de la température de la Nef après améliorations



3. La couverture du court Suzanne Lenglen : la gestion du confort à ciel ouvert

Parmi les équipements sportifs, l'opération de couverture du court Suzanne Lenglen à Roland Garros a constitué un défi difficile en matière de confort : le risque majeur était de créer une atmosphère surchauffée pour cet équipement sportif initialement à l'air libre. Des études thermiques dynamiques et aé-

rauliques avaient permis de démontrer que, lorsque la future toile de couverture serait fermée, les apports générés par le soleil et par les occupants seraient compensés par la ventilation naturelle du volume : la température du volume couvert reste ainsi très proche de la température de l'air extérieur.



Couverture du court Suzanne Lenglen

E. ESPACES EXTÉRIEURS : LUTTER CONTRE LES ÎLOTS DE CHALEUR

Dès la conception des bâtiments et des espaces publics, les enjeux d'îlots de chaleur sont pris en compte et traités par une large végétalisation des espaces extérieurs associée à des mesures de gestion de l'eau et à des dispositifs innovants sur des zones présentant des enjeux très forts. Les projets visent la création d'îlots de fraîcheur, accueillants et accessibles y compris en période de stress climatique.

1. Des choix de conception pour des lieux frais et confortables

Les espaces extérieurs sont pensés pour limiter au maximum la formation d'îlots de chaleur urbains et permettre de maintenir un confort relatif des espaces publics en période chaude ou caniculaire. Ainsi, les espaces publics des ZAC et des abords des ouvrages font intervenir des matériaux aux teintes claires et multi-

plient les îlots de fraîcheur végétalisés. La large végétalisation, la maximisation des surfaces de pleine terre et la gestion des eaux pluviales permettent un haut niveau d'évapotranspiration par les végétaux et contribuent à en faire des lieux agréables.

2. La modélisation pour orienter les décisions et comprendre les phénomènes

La SOLIDEO a réalisé en 2020 en partenariat avec le CEREMA une étude innovante sur la promenade Cesária Évora du Village des Athlètes. L'étude croisait des modèles d'évapotranspiration de la végétation et de microclimat urbain (projet COOLVEG) permettant de caractériser l'effet d'îlot de chaleur urbain à l'horizon 2050 et de définir une stratégie d'atténuation avec la végétalisation et le choix de matériaux et revêtements adaptés.

L'approche faisait interagir des modèles numériques microclimatiques et hydrologiques. Le chaînage entre les modèles MARIE et SOLENE-microclimat a permis d'évaluer l'évapotranspiration des espaces végétalisés du Village en distinguant la strate arborée et les strates basses, et en considérant des conditions hydriques des sols tant optimales que sous stress hydrique.

A titre d'exemple, pour l'année 2050 simulée, la demande climatique d'évapotranspiration a été évaluée à 1 150 mm d'eau, alors que l'évapotranspiration réelle sur les espaces végétalisés de la promenade Cesária Évora sera limitée à 950 mm avec l'assèchement des sols. La modélisation montrait que ce stress hydrique serait particulièrement prégnant lors d'une période de canicule, avec une réduction de 65% de l'évapotranspiration. Face à cet enjeu,

des leviers pour favoriser l'évapotranspiration ont été identifiés et intégrés dans la conception des espaces publics :

- au travers du choix des essences d'arbres pour augmenter la densité des feuilles, réduire la résistance stomatique de la végétation ou ancrer les racines plus profondément, ce qui permet d'augmenter l'évapotranspiration annuelle, mais la réduit significativement lors des canicules (sauf pour les racines) ;
- au travers de la conception de chaque secteur pour favoriser le ruissellement des eaux pluviales et leur infiltration dans les espaces végétalisés, ce qui permet de significativement soutenir l'évapotranspiration.

L'enjeu était de créer un microclimat agréable même en période de canicule, en utilisant la végétation qui permet de réduire la température de l'air ambiant. L'étude a montré que la végétalisation permet de réduire de 5 à 10°C les températures à la surface du sol, et de plusieurs degrés l'air ambiant du mail, si l'évapotranspiration est maximale, c'est-à-dire sans stress hydrique. Ces résultats démontrent et quantifient l'importance de la présence d'eau et de la végétation, ils justifient les mesures mises en place en matière d'aménagement de noues et la mise en œuvre d'innovations.

3. Des solutions innovantes de lutte contre les îlots de chaleur sur le Village des Athlètes

Des solutions innovantes de lutte contre les effets d'îlots de chaleur ont été déployées au Village des Athlètes. Elles reposent sur des matériaux adaptés, des revêtements drainants et le traitement in situ des eaux usées pour

l'irrigation de la végétation. Ces solutions – dont certaines constituent des innovations de rupture – permettront de réduire la température ressentie et d'accroître le confort dans les espaces publics.



Les solutions innovantes de lutte contre les îlots de chaleur GREENBOW

Le procédé Green Bow développé par l'entreprise Nereus permet le traitement des eaux usées et sa réutilisation pour l'irrigation de la végétation. Le dispositif de vanne implanté sur le réseau d'eaux usées ainsi que le procédé de traitement par filtration céramique constituent de véritables innovations technologiques.

Avec l'utilisation des eaux usées d'une canalisation adjacente et la capacité du système Recynov de 1,2 m³/h d'eaux usées retraitées, le projet permet d'irriguer l'ensemble des espaces de la place Ampère et de la promenade Cesária Évora, soit 108 arbres, 1 605 m² de gazon, 2 922 m² de massif (dont 1 238 m² de xérophiles). Concernant l'irrigation des arbres, le système prévoit une injection souterraine autour de la motte. L'apport sera hebdomadaire pour les arbres. Le but est, dans un premier temps, de favoriser le développement racinaire pour coloniser l'intégralité de la fosse de plantation.

Dans un deuxième temps, l'arrosage permettra de réduire les situations de stress hydrique en cas de sécheresse, tout en préservant la ressource en eau et en maintenant la

capacité d'évapotranspiration des végétaux même en période de sécheresse. Grâce à l'évapotranspiration, les températures de surface pourront être localement abaissées de 10°C et les températures d'air de plusieurs degrés (entre 2°C et 4°C) permettant de maintenir un îlot de fraîcheur dans l'espace public.

Un réseau de capteurs mesurant l'humidité et température du sol a été déployé. Il permet d'optimiser l'arrosage, comme le montre la figure ci-dessous. Ceci s'applique par ailleurs à l'intégralité des espaces verts du Village des Athlètes.

La gestion d'une unité de traitement d'eaux usées par le gestionnaire de la voirie, ici l'EPT Plaine Commune, peut poser des questions juridiques de compétences qu'il s'agit de traiter bien en amont du projet. Par ailleurs, si aujourd'hui ce type de projet est bien encadré sur le plan de la sécurité sanitaire, la SOLIDEO a rencontré des difficultés liées à la réglementation environnementale, qui ne prend pas encore en compte ce type de dispositif intermittent à des seules fins d'irrigation. Une demande de dérogation est en actuellement instruite par les services de l'Etat.



Capteurs d'humidité et température du sol

Distribution des capteurs d'humidité et température du sol sur le Village des Athlètes





Les solutions innovantes de lutte contre les îlots de chaleur COOL GROUND

Cool Ground (entreprises Emulithe, Vertuo et Seureca) est un dispositif de lutte contre les effets d'îlots de chaleur urbain.

L'innovation s'articule autour de cinq solutions techniques permettant la récupération, le stockage et la redistribution de l'eau ruisselant sur les espaces publics à des fins de rafraîchissement. L'innovation réside dans la combinaison de ces solutions à l'échelle d'une rue au sein d'un dispositif piloté.

L'innovation mise en place rue Ampère sur un linéaire de 125 mètres au droit du collège Dora Maar combine une chaussée réservoir, des bacs végétalisés (pertinents sur cette zone traversée par de nombreux réseaux), des trottoirs en pavés réalisés à partir de coquillages qui restituent l'eau et une station météo pour le pilotage de l'ensemble du dispositif.

Le principe est de stocker les eaux pluviales dans la chaussée afin de les restituer à la végétation et aux pavés environnants en période chaude et sèche, permettre leur « transpiration » et par conséquent le rafraîchissement de l'espace public.

Ce système innovant, entièrement pilotable à distance, est complété par une station météo

permettant d'indiquer s'il est nécessaire ou non de déclencher « un rafraîchissement ». Le volume d'eau stocké permet une autonomie d'environ 16 jours, sur la base d'un fonctionnement de 9 h/jour et si la cuve de stockage de 50 m³ est pleine.

En cas de forte chaleur (déclenchement du système prévu à partir de 35 degrés et plus), le système de goutte à goutte sous les pavés se déclenche. L'eau des pavés mouillés s'évapore et apporte une sensation de rafraîchissement. La baisse de température des pavés est estimée à 15°C avec un ressenti de - 2°C.



Coolground

4. La captation pour confirmer les hypothèses et préfigurer de nouveaux usages

Afin d'offrir aux futurs habitants du Village des Athlètes un cadre de vie confortable et agréable, malgré des phénomènes météorologiques extrêmes de plus en plus fréquents (canicules, sécheresses, pics de pollution de l'air...), l'EPT Plaine Commune doit pouvoir assurer une gestion optimale des innovations et une communication efficace avec les habitants pour anticiper et gérer les situations de crise.

La SOLIDEO a souhaité ainsi préparer les conditions permettant :

- Une gestion optimale des innovations, pour en tirer le meilleur parti en matière de confort d'été dans l'espace public, tout en minimisant les consommations de fluides et les éventuelles nuisances générées.

- Une communication efficace avec les habitants pour anticiper et gérer les situations de crise, par exemple en créant des cartes dynamiques des îlots et des parcours de fraîcheur, de jour comme de nuit, mises à disposition des populations et confortées avec des données mesurées sur le terrain.

- L'étude des effets de la conception bioclimatique, de la végétation et des innovations Green Bow et Cool Ground sur le microclimat du Village, afin d'en tirer des leçons sur les stratégies de gestion des îlots de chaleur urbains.

- La conception d'innovations et d'outils de suivi pouvant être reproduits ou élargis à l'ensemble du territoire de Plaine commune, voire alimenter en enseignements la

production des futurs PLUi, PCAET, etc. Pour ce faire, la SOLIDEO a déployé, depuis 2022, des capteurs météorologiques dans le périmètre de la ZAC. Initialement utilisés pour monitorer les effets des chantiers sur l'environnement immédiat, ils ont ensuite été repositionnés avec l'objectif de collecter des séries temporelles longues, pour bâtir une base de données caractérisant le Village avant la mise en place des différentes mesures de végétalisation et des innovations.

Afin de permettre une analyse approfondie et scientifiquement solide des données ainsi collectées et de les enrichir, la SOLIDEO s'est rapprochée de deux organismes :

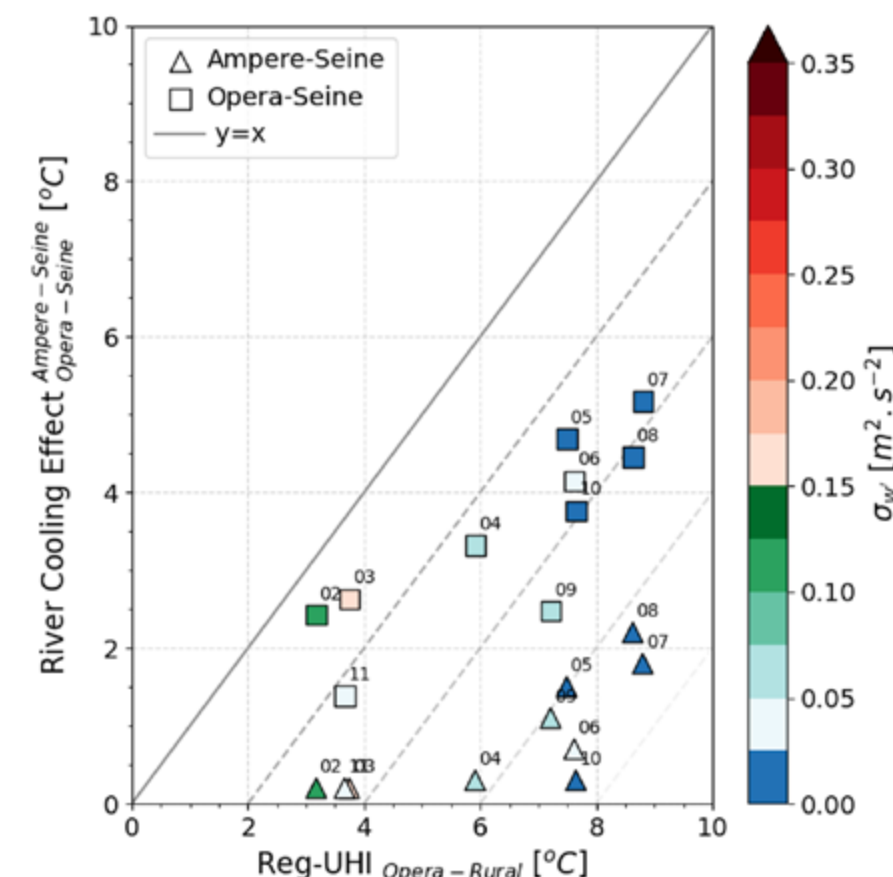
- L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), une fédération de recherche qui rassemble neuf laboratoires en sciences naturelles du climat, représentée par le CNRS et l'Ecole polytechnique. L'IPSL conduit depuis 2022 des études sur les îlots de chaleur urbains en région parisienne, et sur l'impact des parcs urbains et autres surfaces perméables en ville sur le refroidissement nocturne. Dans ce cadre, l'IPSL est intéressé à étudier les effets de la végétation et des innovations mises en place au sein des espaces de la ZAC du Village Olympique et Paralympique.

- La société Murmuration, spécialisée dans la mise à disposition de données satellitaires pour visualiser les effets du réchauffement climatique et permettre un suivi des indicateurs de pollution de l'air, et des îlots de chaleur urbains.

Grâce à la collaboration avec ces acteurs, la SOLIDEO d'abord et Plaine Commune ensuite pourront documenter durant cinq années les effets des aménagements réalisés, afin de prendre l'effet à moyen terme des innovations et de l'accroissement de la végétation.

Les premières données des capteurs montrent que sur le Village des Athlètes, lors d'un épisode de chaleur d'intensité moyenne (septembre 2023), on peut observer jusqu'à 2° C de moins sur les abords de la Seine par rapport au cœur du village, sur la rue Ampère, qui lui-même se comporte davantage comme un parc urbain que comme un cœur de ville. Cet écart grimpe en effet jusqu'à 4° C avec le quartier Opéra, en plein cœur de Paris.

Ecart de température entre le cœur de Paris et le Village des Athlètes

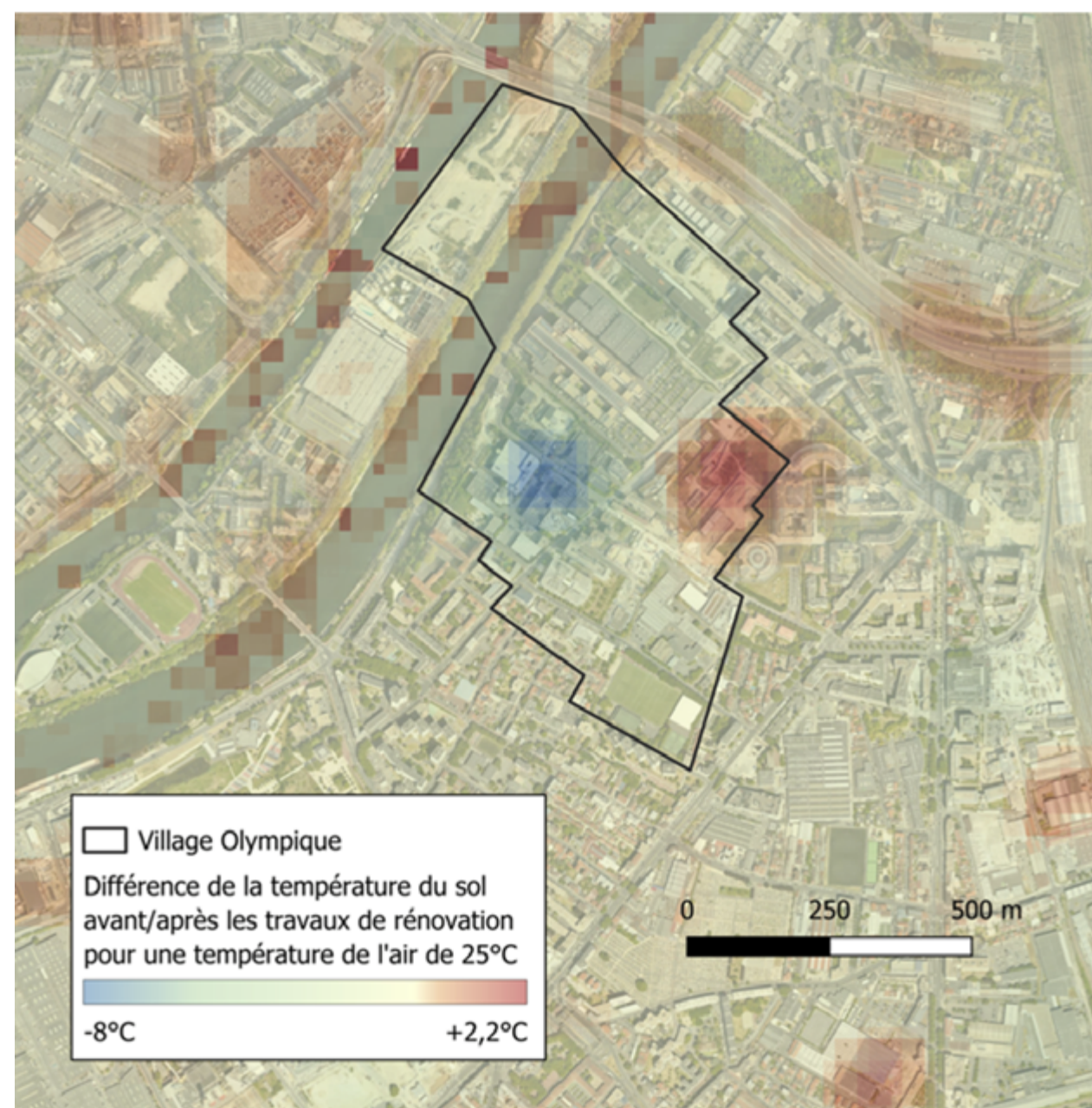


Les premières mesures satellitaires, réalisées par Murmuration montrent que la construction du Village des Athlètes a induit une modification de la température de surface. Il apparaît clairement que les travaux effectués ont apporté une amélioration conséquente en termes de température des sols sur la quasi-intégralité de la surface du Village Olympique.

Cette amélioration est particulièrement marquée sur les nouveaux quartiers des Belvédères et des Quinconces, où on observe une réduction allant jusqu'à 8 °C par rapport

aux températures de surface mesurées en 2019 pour un épisode de chaleur équivalent.

L'unique zone du Village qui échappe à cette tendance est la zone autour du Groupe Scolaire Dora Maar, même si l'augmentation observée est relativement modérée (+2,2 °C). Cela s'explique par la présence de grandes surfaces de revêtements en enrobés, réalisés pour accueillir la gare de bus à haut niveau de service durant les Jeux olympiques et paralympiques, qui seront reconvertis en parc urbain en phase héritage.



Différence de la température au sol sur le VOP entre 2019 et 2023

F. DES AMBITIONS SANITAIRES FORTES NOTAMMENT CONCERNANT LA QUALITÉ DE L'AIR

La pollution de l'air est évidemment une préoccupation sanitaire majeure. Pour l'ensemble des ouvrages olympiques, la SOLIDEO s'est appliquée à définir des objectifs permettant d'offrir des qualités sanitaires optimales concernant à la fois la qualité de l'air intérieur et extérieur.

1. Assurer un air sain dans les logements et équipements sportifs

La SOLIDEO a fixé des objectifs de moyens relatifs aux matériaux mis en œuvre afin de limiter les apports internes en polluants. Les matériaux de second œuvre (peintures, boiseries...) ainsi que les éléments de pose (colles...) prévus sont faiblement émissifs en composés organiques volatils (COV, formaldéhyde...). Il est à noter qu'une partie des apports internes (COV notamment) provient généralement du mobilier des occupants, pour lequel la SOLIDEO et le maître d'ouvrage ont peu de leviers d'actions.

L'enjeu est renforcé par les émissions de la circulation routière, de nombreux ouvrages se situant à proximité d'axes routiers majeurs (l'A1 pour le CAO et le Village des Médias, l'A86 pour le Village des Athlètes, le périphérique pour l'Arena Porte de la Chapelle). Les prescriptions intègrent donc

également l'installation de dispositifs de filtration, notamment à proximité des sources de pollution.

Pour les bâtiments de logement et de bureaux du Village des Athlètes, en se basant sur des protocoles déjà existants, la SOLIDEO a imposé la réalisation de mesure de qualité de l'air à réception. Les paramètres mesurés sont confrontés à des valeurs de référence, qui constituent des niveaux plafonds à ce pas dépasser pour les polluants liés aux matériaux intérieurs ou à l'usage des bâtiments et une valeur cible pour les polluants liés à la situation extérieure. Ces valeurs sont issues des recommandations nationales et internationales de l'ANSES, l'OMS, etc. et portent sur 6 polluants : le dioxyde d'azote, le monoxyde de carbone, le benzène, le formaldéhyde, les particules fines et les COV.



Rénovation du Gymnase Pablo Neruda

a. Le Village des Athlètes : un concentré d'innovations

Des dispositifs innovants en lien avec la qualité de l'air ont été mis en œuvre dans des bâtiments de logement et de bureaux du Village des Athlètes.



Qualité de l'air sur l'écoquartier Fluvial

Une solution de filtration de l'air extérieur adaptée à des immeubles de logement en ventilation simple flux a été installée dans la ZAC de l'Écoquartier fluvial de L'Île-Saint-Denis et une partie des logements du secteur Universeine du Village des Athlètes (la plus exposée à proximité de l'A86).

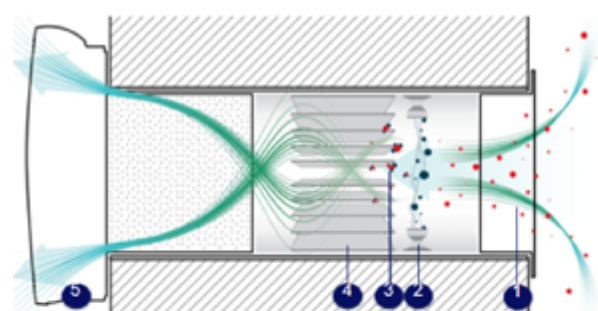
Cette solution, portée par l'entreprise ALDES, comprend des filtres électrostatiques haute performance implantés sur l'ensemble des sorties d'air exposées. Elle permet d'atteindre les niveaux de filtration d'une ventilation de type double-flux, dont la généralisation serait complexe et coûteuse sur des programmes de logements (maintenance, visites régulières...).

La solution technique intègre des entrées d'air murales EHT électrostatiques en façade et réduit ainsi les transferts de polluants

atmosphériques vers l'air intérieur. Ces entrées filtrantes ont une action sur les particules fines présentes dans l'air, avec un taux d'abattement estimé à 90% pour les pollens, 90% pour les particules fines de 10Qmu et 80% pour celle de 2,5Qmu, enfin de 77% pour les bactéries d'1Qmu.

L'absence de filtres évite la problématique courante de leur encrassement en exploitation. La maintenance, réduite au nettoyage par brossage et aspiration, est également facilitée. La gestion de la qualité de l'air intérieur et de son renouvellement sont par ailleurs assurés par des bouches intégrant un capteur de CO₂ dans les cuisines et pouvant être commandées depuis une application smartphone, un capteur d'hygrométrie permettant de varier le débit d'air neuf en fonction des besoins réels et des usages dans les salles de bain.

Principe de fonctionnement de la solution ALDES



Très bonne alternative aux filtres mécaniques

- Très bonne efficacité sur les particules et les bactéries
- Pas de consommable
- Perte de charge faible et constante
- Durée de vie élevée

Principal avantage par rapport à l'ionisation standard

Très haut niveau de capture tout en évitant les décharges électrostatiques et donc l'émission de produits dangereux comme l'Ozone

- 1 L'air extérieur est pollué en particules.
- 2 Les **ioniseurs** produisent des ions dans une zone d'ionisation très localisée (< 1 mm), pour éviter la création de nouvelles particules encore plus dangereuses (ozone, COV,...) – voir les résultats détaillés des tests en laboratoire externe.
- 3 Les ions sont attirés par les particules fines et forment un **amalgame « Ion - Particules »**.
Efficace aussi sur les bactéries pour celles fixées aux particules.
- 4 L'électrofiltre est composé de deux types de **plaques** : l'une chargée négativement qui repousse les particules préalablement ionisées ; l'autre, neutre, qui permet aux particules de se fixer sur ce dernier. Les micro-organismes meurent rapidement.
- 5 Le flux d'air entrant dans le logement est filtré pour un **air plus sain**.



Le pilotage intelligent de la qualité de l'air

Sur le bâtiment de bureaux du secteur E du Village des Athlètes, les entreprises EDF et Dalkia ont déployé une solution, appelée F'AIR PLAY, de gestion intelligente de la qualité de l'air intérieur.

Le projet met en place 3 solutions de filtration distinctes associées à un pilotage intelligent des centrales de traitement d'air (CTA) basé sur l'intelligence artificielle :

- une solution de phytoremédiation pour la CTA du RDC,
- des filtres absolus dans un des compartiments du bâtiment,
- des filtres classiques F7, F9 sur les autres centrales d'air.

Des mesures fiables en temps réel (utilisation de capteurs mesurant les polluants de l'air extérieur et intérieur) et un pilotage prédictif auto-apprenant sont également réalisés.

Le dispositif innovant permet de renouveler l'air avec une vision précise et prédictive des besoins internes, tenant compte de la qualité de l'air entrant (pollution extérieure), de la pollution intérieure et de la capacité épuratoire des dispositifs de filtration installés. Il permettra par exemple de ventiler au bon moment avant un pic de pollution annoncé. L'innovation poursuit le double objectif d'offrir une amélioration garantie et mesurée de la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) et de réduire la consommation d'énergie liée à la ventilation (réduction estimée à 12%).

Les tests réalisés en laboratoire indiquent pour la solution de phytoremédiation une disparition totale du NO₂ pour une concentration inférieure à 30 ppm et un très fort abattement

au-delà, ainsi qu'une diminution de 86 % des polluants COV de la pièce sur une durée de 3 heures, avant stabilisation.

Pour les filtres absolus, les taux d'abattement en particules fines se situent entre 65 et 95 % selon leurs tailles. Des mesures in situ sont prévues en phase héritage pour confirmer ces valeurs. L'ambition est de construire le cadre de référence national d'une garantie contractuelle de la qualité de l'air intérieur.



Fair Play - Phytoremédiation

b. Le CO₂ principal polluant des enceintes sportives et groupes scolaires.

La qualité de l'air a des impacts sur le confort mais aussi sur la santé des occupants. Dans la cadre d'une enceinte sportive comme l'Arena Porte de la Chapelle, le principal polluant est émis par les visiteurs et c'est le dioxyde de carbone (CO₂). Si sa concentration devient trop importante, c'est-à-dire qu'elle dépasse les 1000 parties par millions (ppm), alors des effets se font sentir : somnolences, plaintes de mauvais air, etc. Au-delà de 2000 ppm, des maux de têtes et des nausées peuvent apparaître, les symptômes s'amplifiant avec l'augmentation de la concentration.

Dans les établissements recevant du public, il convient de s'approcher le plus souvent de la valeur de 400 ppm qui correspond à la concentration extérieure en CO₂ et de ne pas dépasser la valeur de 1000 ppm qui constitue le seuil tolérable haut en lieux fermés. Pour y répondre, le renouvellement d'air de l'Arena Porte de la Chapelle est asservi au taux de CO₂ par la mise en place de sondes, et permet de garantir un taux inférieur à 600 ppm.

Pour y parvenir malgré une occupation variable, il a été nécessaire de concevoir l'ensemble du système de ventilation en conséquence, en réalisant notamment des études poussées sur la concentration de CO₂ et l'écoulement de l'air dans différentes configurations menées conjointement par un bureau d'étude, l'installateur CVC et l'entreprise générale.

Une des difficultés qui a été rencontrée pour garantir ce résultat était la variabilité des hypothèses sur la quantité de CO₂ émise par les visiteurs. En effet, plusieurs valeurs existent dans la littérature et de nombreux facteurs, non-maîtrisés en conception, impactent fortement le résultat, comme la taille, le poids, l'âge et l'activité métabolique des occupants. Des hypothèses margées, validées avec la maîtrise d'ouvrage, ont donc été prises.

Les bons résultats apportés par la phase modélisation seront vérifiées par l'exploitant dans les différentes configurations de la salle. Dans une moindre mesure, puisque le taux d'occupation n'est pas aussi élevé, les groupes scolaires font aussi face à cette pollution au carbone. Des sondes permettent de mesurer en continu le niveau de dioxyde de carbone dans les classes ont été installées. Celles-ci sont directement reliées à la GTB du bâtiment

qui peut augmenter les débits de ventilation en conséquence.

c. La gestion des trichloramines dans les piscines

Les trichloramines, qui sont à l'origine de l'odeur caractéristique des halls de piscine, sont générées par la réaction entre des matières organiques (sueur, salive, etc.) et le chlore utilisé sous différentes formes pour la désinfection de l'eau. Les trichloramines sont des agents irritants qui peuvent provoquer des pathologies notamment chez les travailleurs de piscines.

La SOLIDEO a donc souhaité imposer des objectifs très restrictifs en matière de présence de trichloramines, soit une concentration de 0,2mg/m³ inférieure à la valeur limite d'exposition professionnelle définie à 0,5mg/m³.

La présence de trichloramine dans l'air de la halle bassin est une conséquence de la qualité d'eau et du taux de chlore combiné dans les eaux de baignade. Plusieurs leviers ont donc été actionnés dans la construction et la rénovation des piscines pour assurer le respect des valeurs seuils.

- La réduction de la quantité de chlore utilisée : le système de filtration des eaux est donc primordial pour assurer une bonne qualité de l'air intérieur. Les systèmes de filtration actuels avec des filtres à diatomée ou filtres à perlite permettent une utilisation moindre de chlore pour le traitement de l'eau que les filtres à sable notamment.
- La diminution de la quantité de chlore et de ses produits dans l'eau post-filtration : l'utilisation de déchloramineurs placés sur les réseaux d'eau permettent, grâce à l'utilisation d'une technologie à UV, de détruire les chloramines présentes dans l'eau et dont sont issues les trichloramines.
- La réduction de la quantité de chlore et de ses produits dans l'air, grâce à l'installation d'un système de ventilation efficace.

La construction des piscines neuves du programme de la SOLIDEO a donc actionné ces trois leviers.

Les rénovations de piscine ne prévoyaient pas systématiquement d'agir sur l'ensemble de ces leviers. Pour la piscine Georges Vallerey, par exemple, la concentration de trichloramines mesurée en amont des travaux montrait seulement un léger dépassement

de l'objectif avec une concentration à 0,244mg/m³ qui ne nécessitait a priori pour être corrigé ni le changement du système de filtration de l'eau ni l'installation de déchloramineur. Les équipes d'étude ont donc utilisé la modélisation en dynamique des fluides pour comprendre les limites du système de ventilation actuel. Celle-ci a révélé l'accumulation des trichloramines au niveau de la surface des bassins et des plages. Cette étude a amené les équipes projet à privilégier la rénovation des installations de traitement de l'air en agissant sur trois paramètres : l'augmentation du taux de renouvellement d'air, l'augmentation du taux de brassage et l'installation d'un soufflage laminaire au niveau des plages. La simulation montre que le projet de rénovation de l'installation de traitement de l'air permet une réduction de 27% de la concentration de trichloramines.

L'efficacité des solutions contre les trichloramines sont mesurées par des analyses régulières en phase d'exploitation. La SOLIDEO et les maîtres d'ouvrage pourront donc après quelques mois d'utilisation valider l'atteinte des objectifs.

En complément de ces pratiques, le Centre Aquatique Olympique a également installé un dispositif innovant : une solution de monitoring en continu de la qualité d'air (NemoPOOL). La solution technique retenue maintient en permanence le niveau de qualité d'air souhaité en mesurant en continu les conditions intérieures du hall bassin (Température, humidité relative, CO₂ et Trichloramines) et en agissant directement sur la ventilation en cas de dépassement du seuil. L'automatisation permet ainsi un suivi plus fin et continu de ces polluants.

2. Des innovations pour agir sur la qualité de l'air extérieur

La grande majorité des ouvrages olympiques est localisée en Ile-de-France dans des espaces soumis régulièrement à des épisodes de moindre qualité de l'air extérieur. En complément des politiques publiques menées à l'échelle territoriale en matière de réduction des émissions liées au transport routier notamment, la SOLIDEO a mené une démarche proactive en matière de qualité de l'air à travers plusieurs aspects :

- la conception d'ouvrages visant à favoriser les déplacements doux (aménagement et valorisation de cheminements piétons et de pistes cyclables, connexion facilitée aux transports en commun, pistes cyclables...) ;

- la mise en place, à une échelle très localisée, de solutions innovantes de traitement de l'air extérieur contribuant à préserver le confort et le caractère accueillant des espaces extérieurs.

Une démarche de dialogue compétitif a été déployée sur les espaces publics du Village des Athlètes.

La SOLIDEO a porté une attention spécifique à la qualité de l'air extérieur, à travers un objectif de pacification des quartiers, un suivi de la qualité de l'air et une importante démarche d'innovation. La SOLIDEO était ainsi signataire,

aux côtés de l'État et de Plaine Commune, du Protocole d'accord relatif à la qualité de l'air et du bruit autour du quartier Pleyel à Saint-Denis, en tant qu'aménageur du Village des Athlètes et au titre de la supervision du projet de réaménagement de l'échangeur Pleyel porté par la DIRIF.

Un marché de coopération a également été signé entre la SOLIDEO et Airparif afin d'étudier les facteurs influençant la qualité de l'air du Village des Athlètes et définir des stratégies de gestion des pics de pollution. S'appuyant sur un réseau de capteurs de qualité de l'air mis en place par la SOLIDEO, les résultats de ces analyses seront connus en phase héritage.

En complément de ces démarches de suivi, la SOLIDEO a également été à la recherche de solutions actives sur la qualité de l'air. Une démarche de dialogue compétitif a été lancée, elle est destinée à déployer des solutions innovantes sur les espaces publics du Village des Athlètes afin de créer des îlots d'air purifié à une échelle très localisée.

Deux solutions ont été réalisées pour la phase Jeux. Ces technologies innovantes distinctes permettent de s'adapter aux différents contextes et usages.



Les Aérophiltres sur la Place des Athlètes

L'aménagement consiste en la mise en place de 7 ombrières dont 5 équipées d'une solution de capture par abattement électrostatique des particules fines en provenance de la circulation routière sur la Place des Athlètes.

Sous la forme d'ombrières surplombant un mobilier urbain, cette solution assainit la Place des Athlètes et la rend plus confortable. Fonctionnant avec l'électricité statique pour l'abattement et des ventilateurs à faible vitesse pour la circulation de l'air, le dispositif est peu consommateur d'électricité, ne contient pas de filtre consommable et permet de traiter des quantités très importantes d'air (plusieurs dizaines de milliers de m³ par heure, contre quelques centaines pour d'autres solutions).

Les cinq ombrières (entre 4,6 et 5,6 m de haut pour 6 m de diamètre) sont à proximité immédiate de l'A86 (300 mètres). Un Aérophiltre a également été installé dans la cour de l'école Anatole France à Saint Denis. Ils sont activables en fonction des niveaux de pollution ambiant, de la météo et de l'affluence. L'innovation permet d'atteindre en sortie de

l'appareil un taux d'abattement de la pollution de 90 à 95%. Les particules PM 10, PM 2,5 et jusqu'au PM 0,1 sont capturées grâce à un champ électrostatique au moment du passage de l'air dans l'appareil. L'air filtré se mélange ensuite à l'air extérieur : l'effet du dispositif dépend ainsi beaucoup des conditions de vent.

Une expérimentation a été réalisée durant le deuxième trimestre 2024 en partenariat avec Airparif, association agréée de surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France. Six capteurs de qualité de l'air Kunak ont été installés sur les Aérophiltres, à proximité du mobilier d'assise et à un endroit de référence de la Place des Athlètes, plus éloigné des appareils. Les Aérophiltres ont été actionnés en suivant un protocole défini chaque semaine en fonction des prévisions météorologiques.

Un rapport définitif est en cours de préparation par Airparif. Les premières analyses montrent qu'il existe bien une différence entre les niveaux de particules mesurés à l'entrée et à la sortie des Aérophiltres (voir ci-dessous). Cependant, les niveaux de pollution étaient

particulièrement faibles durant la période considérée et les conditions météorologiques étaient très dispersives. Il n'a donc pas été

possible d'évaluer avec certitude l'efficacité de la configuration d'installation des appareils sur la Place des Athlètes. De nouvelles mesures seront réalisées durant la phase héritage.

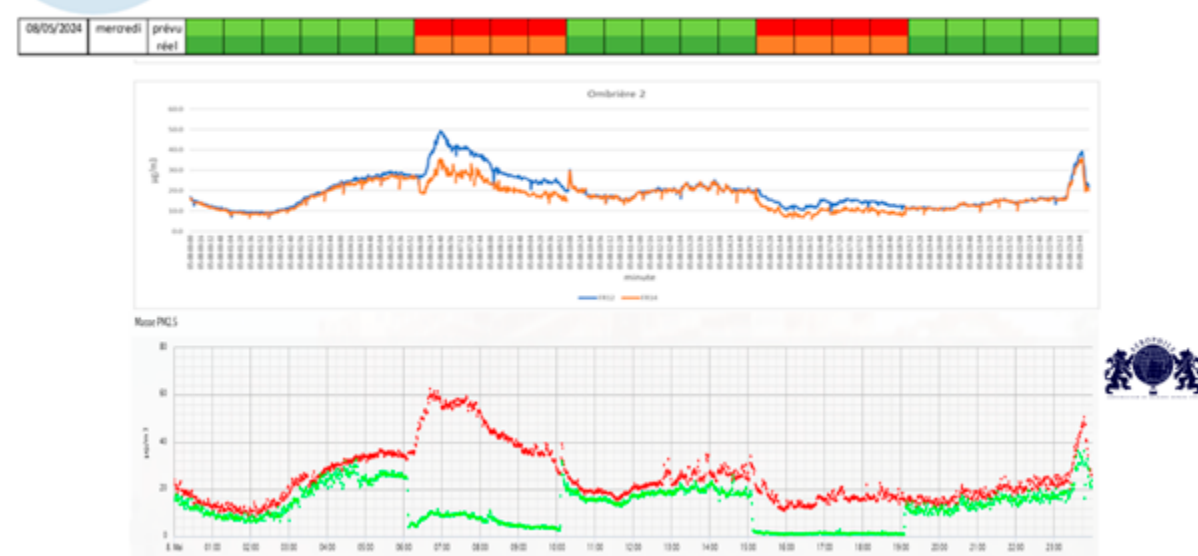


Aérophiltres présents sur la Place des Athlètes

Les résultats préliminaires montrent tout de même que la situation particulièrement exposée au vent de la Place des Athlètes réduit le périmètre d'influence des Aérophiltres. Pour de futurs déploiements de cette innovation, il conviendra donc de privilégier des endroits plus abrités, comme des cours d'école ou des endroits où une faible ventilation naturelle peut conduire à une accumulation de particules fines.

Les premiers mois de fonctionnement ont également permis de constater que l'appropriation des appareils fait émerger d'autres usages, qui montrent des contributions supplémentaires des appareils aux objectifs de résilience et d'adaptation au changement climatique. Que ce soit durant la phase d'expérimentation ou pendant les Jeux Olympiques et Paralympiques, le dispositif a notamment montré son intérêt pour le confort des usagers et des athlètes lors des pics de chaleur.

PM_{2.5} EXEMPLE JOURNÉE DE FONCTIONNEMENT



Graphique du haut : Niveaux de particules PM_{2.5} en entrée (courbe bleue) et au pied (capteur local) des Aérophiltres (courbe orange)

Graphique du bas : Niveaux de particules PM_{2.5} en entrée (courbe rouge) et en sortie directe (capteur interne) des Aérophiltres (courbe verte)



La solution Terrao intégrée au mobilier urbain

Une solution de traitement de l'air par lavage à l'eau et diffusion de l'air purifié dans l'espace public a été installée à proximité de la Seine dans le Village des Athlètes. Habillé par des mobiliers d'assise, le dispositif diffuse l'air purifié et rafraîchi au niveau des usagers assis sur les bancs. Il traite différents types de polluants (particules fines, oxydes d'azote ...) et sa capacité de rafraîchissement le rend très intéressant en périodes chaudes. Les premiers retours d'expérience ont montré qu'une interface de pilotage était nécessaire pour assurer sa mise en fonctionnement aux moments les plus pertinents. Ce volet sera réalisé en phase héritage.

Le système comprend une réserve d'eau de 250 litres circulant en boucle fermée et permettant le lavage de l'air. Grâce à une circulation d'eau continue, l'air entrant transfère ses principaux polluants. L'air est aussi significativement rafraîchi : il est estimé que si l'air extérieur entrant est à 33° C, il ressortira à environ 20° C. De la même manière, pour un air entrant à 26° C, il ressortira à 18° C avec une hygrométrie de l'ordre de 60 %. Les performances du dispositif seront confirmées en phase héritage.



Bancs dépolluants

Les expérimentations et observations préliminaires semblent indiquer que les appareils de traitement d'air extérieur apparaissent comme des objets qui fédèrent autour de nouveaux usages. Puisqu'ils s'appuient sur une diffusion d'air purifié mécanique, en période caniculaire ils invitent naturellement les usagers à s'installer à proximité, afin de profiter de la ventilation qu'ils génèrent, et qui dans le cas de l'installation Terrao produit également du rafraîchissement. Dans le cas des Aérofiltres, l'innovation a l'avantage secondaire de créer un environnement ombragé, qui profite aux passants et usagers durant des moments de pause et convivialité.

Dans une perspective de répliquabilité, il apparaît nécessaire de bien prendre en compte les conditions micro locales du lieu d'implantation, en privilégiant les endroits où l'air est stagnant. Ceci permettrait d'amplifier l'effet bénéfique de la ventilation mécanique et l'accumulation d'air purifié.

Enfin, pour toutes les innovations dans les espaces publics, la SOLIDEO a prévu un accompagnement de la collectivité dans la prise en main des dispositifs et le développement d'outils de pilotage qui permettent d'en maximiser l'efficacité en minimisant les ressources employées : énergie, eau, entretien, maintenance, ...



Le Village pendant les jeux



FAIRE DE LA VILLE UN SUPPORT DE BIODIVERSITÉ

FAIRE DE LA VILLE UN SUPPORT DE BIODIVERSITÉ

A. RESTAURER ET CRÉER DES ÉCOSYSTÈMES

A l'heure de la sixième grande extinction des espèces, la SOLIDEO a considéré la réconciliation entre la ville et la biodiversité comme un impératif de la ville du XXI^e siècle, et donc de sa mission.

Dès la conception des projets, et avec une stratégie adaptée pour chacun d'entre eux, la SOLIDEO a recherché à combiner les fonctions urbaines et celles des processus écologiques du territoire, dans l'objectif de préserver la diversité du vivant. La systématisation du diagnostic écologique (inventaires faune / flore, analyses du sol, du climat ou encore de l'eau) a permis, pour chacun des projets, d'appréhender l'écologie à toutes ses échelles : de la parcelle jusqu'au territoire métropolitain.

Ces inventaires, et les études réglementaires associées, ont permis d'inclure dans la conception des mesures pour éviter et réduire les impacts sur la biodiversité. Des mesures de compensation d'impacts résiduels ont également été définies et mises en œuvre, notamment sur le Village des Médias concerné par la destruction d'habitats d'espèces protégées (habitats ouverts et boisés profitant au Lézard des murailles et à plusieurs espèces de chiroptères et d'oiseaux) au niveau de la frange sud de l'Aire des Vents et sur le terrain des Essences (habitats ouverts et humides profitant au Crapaud calamite, et à plusieurs espèces d'insectes, de reptiles et d'oiseaux). La compensation a consisté en :

- la création et la restauration de mares dans le parc Georges Valbon ainsi que la restauration des habitats terrestres autour des mares par le CD93 ;
- la plantation de bosquets sur l'Aire des Vents et en bordure du terrain des Essences, au total 2,69 h de boisements sont ainsi recréés ;
- l'amélioration des pelouses en prairies sur

l'Aire des Vents afin d'augmenter la diversité spécifique des espaces ouverts sur 5,21 ha de prairies ;

- la renaturation du Terrain des Essences avec la création de 7,25 ha d'habitats favorables aux insectes, oiseaux et en faveur du Crapaud calamite.

La Colline d'Elancourt fait également l'objet d'une mesure de compensation liée au défrichement de 15 571m² de boisement au sens du code forestier, compensé par la réalisation de travaux d'amélioration sylvicole (remplacement du Robinier par des espèces forestières indigènes) et de valorisation écologique sur site sur une surface de 18 000m².

Les diagnostics écologiques ont permis de fonder pour chaque projet la stratégie de développement des écosystèmes : définir les habitats cibles et améliorer les habitats existants appauvris par une biodiversité trop peu complexe.

Au-delà de ces enjeux réglementaires liés à la conservation des espèces et des habitats, et la stratégie biodiversité de la SOLIDEO s'articulait autour de deux piliers complémentaires :

- l'intégration de la biodiversité à la conception urbaine ;
- la création d'écosystèmes de taille suffisante, cohérents avec les caractéristiques du paysage et l'histoire du territoire.

Avec une approche opérationnelle multifactorielle prenant en compte le diagnostic écologique, le changement climatique et les dynamiques post-aménagement, la stratégie de la SOLIDEO en matière de biodiversité innove et se distingue des méthodes classiques.



Espaces verts dans Le Village des Athlètes

B. LA BIODIVERSITÉ AU CŒUR DE LA CONCEPTION URBAINE

La SOLIDEO a identifié des enjeux spécifiques aux projets urbains, à partir de l'étude des trames écologiques environnantes, des sols (souvent pollués), du paysage, de l'intégration du bâti (dans toute sa diversité), avec l'objectif de créer des espaces naturels accueillants et de qualité, cohérents avec la nature des sols et les espaces environnants. Devant l'urgence climatique, le végétal devient central dans la conception urbaine, avec de multiples

bénéfices attendus :

- rafraîchir la ville ;
- améliorer la qualité de l'air ;
- protéger la biodiversité en mettant en relation les espaces verts ;
- participer à l'infiltration des eaux pluviales dans le sol ;
- améliorer le cadre de vie : aspect esthétique et paysager.

1. Des continuités écologiques à toutes les échelles

a. Remaillage des grandes trames écologiques

La stratégie environnementale de la SOLIDEO s'est inscrite systématiquement dans le cadre défini par les démarches de renaturation menées et planifiées à l'échelle territoriale par

le vecteur des trames brune, verte, bleue et noire⁵. L'extension des niches écologiques visée par les projets n'a de sens que s'il existe une continuité entre les niches actuelles et les réservoirs de biodiversité. Les ouvrages olympiques sont ainsi pensés comme autant d'éléments de maillage des trames écologiques.

5 - Démarches visant à maintenir et à reconstituer des réseaux d'échanges pour que les espaces animales et végétales puissent circuler, s'alimenter, se reproduire, se reposer et assurer ainsi leur cycle de vie (source : ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires)

L'exemple du Village des Médias

Pour assurer la continuité des trames verte et bleue au travers du Village des Médias, la SOLIDEO a choisi de ne pas urbaniser les zones de passage clés. La renaturation du Terrain des Essences et la protection de la

Pigeonnière renforcent le lien entre l'Aire des Vents et le parc départemental Georges Valbon. Le parc, classé Natura 2000, ne subit aucune intervention pérenne afin de protéger la biodiversité existante. Seule la lisière Sud de l'Aire des Vents est construite.



Restauration du lien entre l'Aire des Vents et le Parc départemental Georges Valbon

Au sein des lots immobiliers, les corridors écologiques régionaux sont préservés, notamment le Corridor du Vallon écologique, vers les bassins de la Molette et vers le parc de la Saussaie (voir les axes en orange sur l'image ci-dessus). C'est par lui que migrent les oiseaux des roselières dont le Blongios nain, le plus petit héron d'Europe.

Le projet urbain renforce également les continuités écologiques de la trame verte locale, avec :

- L'axe RD50 largement planté et continu avec la passerelle pour la circulation des chiroptères ;
- Des plantations arborées denses de petit bois pour les oiseaux forestiers (hibou moyen duc) aux abords de l'Aire des Vents ;
- Des espaces végétalisés publics et privés (noues, bermes, prairies, jardins...) et à dominante indigène et florifère pour les insectes ;
- Des jardins et toitures entre homme et nature, mariant végétal sauvage et cultivé ;
- Une passerelle intégrée par le végétal sur ses accès : petit bois du Bourget et talus des bassins.

De grands espaces ont été pensés au sein des lots immobiliers afin d'ouvrir les vues et rendre le bâti perméable à la nature. Ces espaces participent à la « ville jardin » : le Village des Médias se compose ainsi de bâtiments insérés dans l'environnement naturel.

Les secteurs de transition entre les zones naturelles et les quartiers aménagés ont été pensés comme des lieux d'échange riches de cette biodiversité caractéristique des lisières. Entièrement végétalisés, ils assurent la perméabilité environnementale des espaces et conservent les continuités au sein du Village. Ils forment même un habitat nouveau, qui accueille la flore et la faune naturelles du territoire.

Des haies vives assurent le rôle d'interfaces perméables entre les espaces publics et les jardins collectifs. Les limites naturelles que forment les talus sont reboisées et retrouvent un rôle protecteur et écologique de ceinture verte. Sur le secteur du Plateau, au dénivelé important, des terrasses successives marquent progressivement l'interface et laissent le passage à la faune, à la lumière, à l'eau et au végétal.

Continuité de la trame verte sur le Village des Médias



b. Pleine terre et continuités écologiques

Au sein des Villages des Médias et des Athlètes, les habitats ont été pensés afin d'étendre les niches écologiques des espèces initialement présentes sur le site grâce aux bonnes conditions de sol et de flore (les spécificités des habitats mis en œuvre sont présentées page 151). Pour cela, les sols ont été connectés entre eux afin de participer à la trame brune régionale et locale et favoriser ainsi les échanges de populations. Les bandes plantées ont ainsi par exemple été préférées aux arbres sous grilles individuelles.

Sur le Village des Athlètes, le projet urbain a permis d'augmenter les surfaces de pleine

terre et de réaliser des connexions entre les différents espaces verts créés. Un taux élevé de surfaces de pleine terre est indispensable au développement de milieux riches, avec une diversité d'essences, capables de tirer efficacement parti des précipitations et participant à l'infiltration des eaux pluviales. Ces surfaces de pleine terre participent pleinement au renforcement des trames existantes et à la qualité du cadre de vie.

Pour la majorité des projets, un taux d'espaces verts et paysagers supérieur à 20% a été fixé, en privilégiant les espaces de pleine terre quand cela est possible.

1,58 HECTARE

de cœurs d'îlot végétalisés sur les lots immobiliers du Village des Athlètes (partie continentale) dont 1,28 hectare* de surface de pleine terre, soit 18,7 % de pleine terre

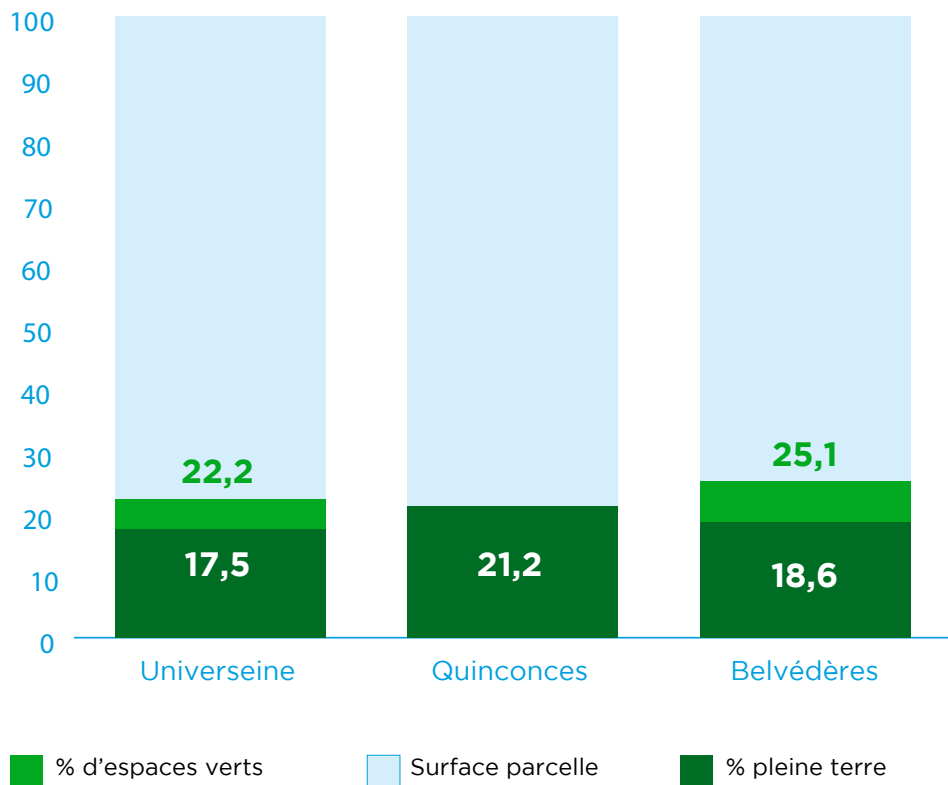
2,85 HECTARES*

d'espaces verts soit 28% (dont 100% en pleine terre) sur les espaces publics du Village des Athlètes (partie continentale)

6 HECTARES

d'espaces verts publics en héritage, dont environ 3 ha pour le futur Parc Ampère

*selon les données phase JOP, et donc sans prendre en compte la suppression des plateformes de Paris 2024, et en particulier la réalisation du parc Ampère aux Village des Athlètes.



Part de la surface d'espaces verts au sol dont de pleine terre par secteur du Village des Athlètes

Les espaces publics du Village des Athlètes se compléteront en phase héritage avec la transformation de la gare routière en parc, cœur de biodiversité du quartier. Le futur Parc Ampère, d'environ 3ha, accueillera un bois en pleine ville créant un lieu de vie pour les habitants mais également pour la flore et la faune.

Les usages et l'accessibilité du parc seront modulés afin d'assurer à la fois une appropriation par les futurs habitants du quartier et le développement de la biodiversité. Pour cela, certaines zones sont sanctuarisées et rendues inaccessibles au public.

Au sud-est, le parc accueillera une lisière dense et inaccessible réservée à la biodiversité, une prairie sèche pour grillons sera également créée sur l'ouvrage d'entonnement de la SGP. A contrario, les zones plus intensément

utilisées seront les clairières semées en prairie fleurie, qui accueilleront les différents usages du parc, la lisière habitée qui longe l'allée du parc et les jardins en pied de la résidence étudiante.



La pleine terre pour assurer une gestion durable des eaux pluviales

La gestion des eaux pluviales sur la ZAC du Village Olympique et Paralympique et sur la ZAC du Cluster des Médias est réalisée avec l'objectif du « 0 rejet » d'eaux pluviales pour les pluies courantes (12mm) et la rétention sur les parcelles qu'elles soient privées ou publiques, jusqu'à un temps de retour décennal.

La limitation de l'imperméabilisation des sols et la préservation de pleine terre au sein des projets (cœurs d'îlots privatifs, espaces publics, parc urbain...), réduisent l'impact de l'urbanisation sur la nappe par l'infiltration directe des eaux de pluie dans le sol (et non intégralement rejetées en réseau comme initialement).

Sur la ZAC du Village Olympique et Paralympique, lors d'événements pluvieux exceptionnels, les eaux pluviales sont gérées selon un fonctionnement en « rue rivière » vers la Seine,

permettant de protéger les parcelles privées du risque d'inondation et de conserver au maximum les fonctions urbaines, et notamment la continuité des cheminements piétons.

Les toitures végétalisées des bâtiments participent également à l'abattement des eaux pluviales en contribuant à l'objectif d'abattement volumique de la pluie de 12 mm.

L'évapotranspiration et l'infiltration sont en grande partie permises par l'installation d'espaces végétalisés de gestion des eaux pluviales à ciel ouvert (noues, espaces verts en creux, fosses d'arbres décaissées). Ces aménagements ont été intégrés au projet paysager des deux villages. La gestion des espaces verts, sur les espaces publics et privées, y sera réalisée en zéro-phyto, limitant ainsi le risque de pollution.

Les espaces publics du Village des Athlètes se compléteront en phase héritage avec la transformation de la gare routière en parc, cœur de biodiversité du quartier. Le futur Parc Ampère, d'environ 3ha, accueillera un bois en pleine ville créant un lieu de vie pour les habitants mais également pour la flore et la faune.

Les usages et l'accessibilité du parc seront modulés afin d'assurer à la fois une appropriation par les futurs habitants du quartier et le développement de la biodiversité. Pour cela, certaines zones sont sanctuarisées et rendues inaccessibles au public.

2. Créer des sols fertiles

a. Typologie des sols et réemploi des terres

Pour garantir la qualité des sols et la continuité de la trame brune, la SOLIDEO a imposé des règles strictes en matière de traçabilité et d'origine des terres, notamment en favorisant autant que possible l'utilisation de terre végétale issue du réemploi, ou à défaut des terres excavées du même fond géochimique (rayon de

moins de 500 km) afin d'éviter le déséquilibre des sols locaux et leur contamination par des graines extérieures. L'objectif de la SOLIDEO était de pouvoir se dispenser de terres issues du secteur agricole. Cet objectif a été respecté sur les secteurs privés du Village des Athlètes. Sur les espaces publics du Village des Athlètes, les impératifs de disponibilité des terres dans des délais de réalisation extrêmement contraints

ont conduit à ce que seulement 46% des terres végétales soient issues de terres réemployées in situ ou de l'amendement de terres excavées située dans un rayon de 500 km. Les 54% restants sont donc issus de terres végétales issues du secteur agricole. Ce taux devrait passer à 31% en héritage, avec notamment la réalisation du Parc Ampère.

Les projets ont porté une attention particulière à la typologie des sols et à leur histoire. Toutes

les terres excavées ont été traitées en vue de leur possible réutilisation in situ ou ex situ. Ce traitement des terres et leur réutilisation ont nécessité des capacités logistiques et la disponibilité de fonciers, véritable enjeu en zone urbaine dense. Des zones de stockage ont été aménagées sur site lorsque cela était possible, au Terrain des Essences ou sur le Village des Médias, ou délocalisées et accessibles par voie fluviale comme à Bruyères-sur-Oise pour le Village des Athlètes.



L'exemple du Terrain des Essences

Le projet du Terrain des Essences, sous la maîtrise d'ouvrage du département de Seine-Saint-Denis, concerne un ancien dépôt de carburants du ministère des Armées. Bombardé pendant la Seconde guerre mondiale, le terrain était resté très pollué. Une dépollution pyrotechnique avait été réalisée sur six mètres de profondeur en 2012 sans traiter la couche de pollution par hydrocarbures au-dessus de la nappe phréatique. Celle-ci pouvait atteindre 90 cm d'épaisseur et s'étalait sur 22 000 m². Les services de l'Etat ont imposé le maintien de 2/3 du secteur sans intervention de dépollution dans le but de préserver les espaces verts existants, notamment la zone nord dédiée à la préservation de la biodiversité et notamment aux Crapauds calamites.

Sur le reste du site, le Département de Seine-Saint-Denis, maître d'ouvrage, et la SOLIDEO ont fait le choix d'une dépollution in situ permettant de valoriser au maximum les terres existantes sur site et ainsi de limiter à la fois les évacuations vers les filières de traitement et les apports de remblais techniques et de substrats fertiles.

La dépollution du Terrain des Essences a mis en évidence des difficultés liées à l'évaluation des concentrations et aux volumes de terre contaminée. Malgré un diagnostic de pollution minutieux, le chantier a révélé des niveaux plus élevés que prévus et des volumes de terres polluées plus étendus, entraînant ainsi une augmentation budgétaire substantielle pour la dépollution.

Le chantier a généré environ 70 000 m³ de terres excavées dont 58 000 m³ réutilisés sur place et 12 000 m³ évacués avec :

- 37 000 m³ de terres polluées traitées par biopile, qui ont pu en grande partie être réutilisées sur site (34 000 m³). Une petite partie (3 000 m³) qui n'atteignait pas les seuils d'objectifs de dépollution a finalement dû être évacuée ;

- 9 000 m³ évacuées car trop polluées pour être traitées sur place dans le délai du chantier ;

- 24 000 m³, le reste du volume, qui correspond à des terres conformes aux objectifs de dépollution et qui ont été remblayées sur site en fin de chantier.

Le traitement par biopile des terres polluées est une technique qui accélère la dégradation biologique naturelle des hydrocarbures contenus dans les terres grâce à un brassage mécanique de celles-ci couplé à une aération forcée. Un apport de nutriments complémentaires, en particulier d'azote et de phosphore, permet de stimuler l'activité des micro-organismes à l'origine de cette dégradation. Cette méthode s'est révélée très efficace pour les hydrocarbures, principaux polluants du site. Le traitement des COHV (Composés Organiques Halogènes Volatils) a pris plus de temps. Ce sont des polluants plus complexes à dégrader et l'écart entre les concentrations mesurées et l'objectif de dépollution était très important.

Les techniques appliquées se sont avérées performantes sur le plan environnemental et hautement efficaces. Les résultats ont largement atteint les objectifs fixés. La gestion sur place des terres polluées a contribué significativement aux ambitions carbone en évitant l'exportation, et donc le transport, de terres contaminées.

Dans le cadre du projet d'aménagement du Terrain des Essences, les terres de remblais nécessaires au projet porté par le Département de Seine-Saint-Denis a été comblé par les déblais générés par les terrassements réalisés au droit des espaces publics de Dugny, sous maîtrise d'ouvrage de la SOLIDEO, et sur les lots privés du secteur Plateau.

Une convention entre le CD93 et la SOLIDEO a ainsi été établie, précisant les prérequis au transfert des terres vers le Terrain des Essences :

- Le respect de la réglementation en vigueur en matière de gestion de matériaux d'excavation, notamment en ce qui concerne la traçabilité des déblais ;
- Le respect du référentiel de pollution permettant de garantir la compatibilité des terres avec les usages sur le Terrain des Essences (référentiel retenu par le CD93) ;
- Le respect d'une granulométrie spécifique (50 mm) ;
- Le respect de conditions d'entreposage temporaire.

Des analyses ont été réalisées en fonction d'un plan de maillage, avec à minima 1 sondage par maille (lot maximal de 500 m³) afin d'identifier les terres excavées pouvant être réemployées. Les déblais conformes au référentiel ont été stockés sur le Village des Médias, en deux

stocks séparés entre les terres issues des espaces publics (SOLIDEO) et du secteur Aire des vents (SOGEPROM). Conformément aux attentes du CD93, un complément d'analyse a été effectué au droit des stocks de déblais. Deux opérations distinctes de criblage ont ainsi eu lieu, entre mars et mai 2023 pour le stock espace public et entre mai et juillet 2023 pour le stock espace privé. Les fractions >50mm ont été évacuées en filière adaptée.

Ainsi, au total, 27 800 m³ de terres foisonnées ont été apportées au Terrain des Essences (7 050 m³ provenant du stock des espaces publics et 20 748 m³ du stock du lot privé).

85 800 M³

de terres excavées réemployées sur le Terrain des Essences

dont

27 800 M³

(volume foisonné) provenant des travaux de terrassement du Village des Médias.

Terrain des Essences en travaux



b. La reconstruction de substrats fertiles

Afin de limiter les imports et les exports de terre et capitaliser à partir des ressources présentes sur site, plusieurs projets ont mis en œuvre des modes de transformation de terres et de matériaux de déconstruction en nouveaux substrats fertiles.

L'exemple du Village des Athlètes

Dans le Village des Athlètes, la SOLIDEO a identifié une grande variété de sols géologiques avant de définir, à partir de ceux-ci, la composition des substrats fertiles à reconstituer par le recours à des technosols. Ces sols

Mélange 1		Mélange 2	
Béton concassé	20%	Béton concassé	50%
Remblais	60%	Remblais	20%
Composte	20%	Composte	30%

Les observations ont été satisfaisantes, notamment du point de vue de la texture, de la couleur et de l'humidité, mais la composition des formulations a dû être modifiée au regard des analyses en baissant légèrement la proportion de matériaux de déconstruction ;

Une seconde phase de production de substrat a été réalisée en mai 2022 par l'entreprise Sartorius, à partir de l'expérimentation qui a produit 6 060m³ de substrat constitué de

- Béton concassé 10% (<10% d'éléments grossiers de plus de 20mm)
- Remblai 55% (<10% d'éléments grossiers de plus de 20mm) (terre de déblais excavées non contaminées),
- Compost 35%

Cependant, de la terre végétale a été mis en place sur site pour compenser ponctuellement le retard de la production du substrat recyclé. Il s'agit de terre végétale issue de décapages liés à des projets de construction. Le bilan des terres sur le Village des Athlètes est donc le suivant :

- Terre végétale : 4 940m³ (35%)
- Technosol produit à Bruyères sur Oise: 6 740m³ (48%)
- «Terre utile» recyclée : 2 355m³ (17%)

Ainsi 9 095m³ (65%) de substrat recyclé ont été utilisés. Le mélange terre pierre, initiale-

ont été créés à partir de matériaux issus de déchets de déconstruction et de terrassements, l'apport de matière organique étant réalisé avec du compost d'Île-de-France. L'ensemble de ces substrats ont été produits sur la plateforme à Bruyères-sur-Oise à partir de janvier 2021.

Le projet a été mené en deux temps :

- Un premier marché d'expérimentation de production et fourniture de substrat de plantations pour le Village des Athlètes, attribué au groupement Halage, Neo-Eco et ECT qui a produit 680m³ de substrat constitué de deux mélanges différents.

ment prévu au marché en fourniture classique (terre végétale et pierres) a été en grande partie modifié pour intégrer du substrat recyclé (60% du total). La profondeur des fosses de plantation continues a été réduite de 1.5m à 1.2m afin de limiter les apports de terre. Les évolutions de projet liées à Paris 2024 ont également réduit les quantités de substrat total mis en oeuvre.

Une telle expérimentation a représenté une des plus grandes productions de substrats en France et a constitué une véritable première en matériaux de déconstruction. Cette démarche est facilement répliquable si l'on inclut dans les plannings des projets le calendrier de régénération des substrats et si l'on anticipe les besoins de stockage. Le groupement d'entreprises attributaires du marché d'expérimentation a d'ailleurs créé, à la suite de cette expérience, une structure consacrée à la reconstitution de substrats, nommée « Faiseurs de Terre ».

6 000

M³

de technosols produits sur le Village des Athlètes



De nouvelles méthodes de conception des sols urbains

La SOLIDEO a reconstitué sur le Village des Athlètes des substrats fertiles à partir des sols existants et de matériaux issus de la déconstruction qui :

- présentent les mêmes caractéristiques géologiques (calcaire, gypse, sables...) que les sols désignés ;
- ont les mêmes apports en nutriments et les mêmes populations de décomposeurs et de champignons ;
- sont suffisamment profonds pour assurer les fonctions naturelles du sol dans l'écosystème (décomposition, nutrition, rétention des eaux...).

La SOLIDEO a produit ainsi 6740m³ de technosols à partir de 55% de déblais (issus pour 2/3 du Village) et 10% de béton concassé (issu des éléments concassés de la démolition préalable à la ZAC). Au mélange obtenu il a été ajouté 35% de compost, réparti en quatre andains sur la plateforme de traitement des terres située à Bruyères-sur-Oise (à 34 km de la ZAC). Dans une logique de réduction du bilan carbone, le transport des déblais issus du

Village vers la plateforme ont été réalisés en intégralité par barges.

Il était initialement prévu de constituer deux types de sols : le rendosol pour l'Ormaie rudérale et le brunisol pour la chênaie. Les analyses menées sur les deux types de sols obtenus ont fait état de caractéristiques très proches (PH, azote, matière organique...), il a finalement été choisi de réaliser un mélange de ces deux types de sols pour constituer une seule typologie de technosols.

La mise en œuvre a été réalisée sur sol inerte, en épaisseur de 60 à 80 cm avec en couche externe du broyat ou BRF sur 8 cm. Cette expérimentation a permis de fournir en substrat notamment la promenade Cesária Évora ainsi que les côteaux boisés du Village et quelques secteurs de plantation (plantes rudérales, semis de phacélie).

L'utilisation de technosols à cette échelle constitue une innovation reproductible pour les projets d'aménagement. Elle remplace la gestion linéaire usuelle des sols par une gestion circulaire. La SOLIDEO contribue ainsi à repenser la méthode de conception des sols urbains.

L'exemple du Village des Médias

Sur le Village des Médias, le projet d'aménagement des terres excavées a permis de répondre aux enjeux techniques, environnementaux et économiques de la gestion des déblais en limitant les imports et exports de matériaux terreux et en mettant en place les moyens permettant de réemployer in situ les matériaux dans les espaces plantés de la ZAC. Une méthodologie spécifique d'amendement a été réalisée, comprenant l'apport d'un volume de compost pour deux volumes de terres décapées. La plateforme de gestion de ces terres a été installée sur site. Après une période de maturation de 2 à 2,5 mois, les andains ont été retournés par moyens mécaniques, avec intégration du BRF présent en surface, puis nouvelle protection BRF. Cette action permet de réactiver le processus d'intégration du compost dans les sols.

Au total, 1 050m³ ont été déployés, soit 15% du volume utile sur les espaces publics. Ces sols

recomposés sont particulièrement favorables à la vie du sol, dont les Lombricidés épigés et endogés, ainsi qu'à de nombreux autres insectes, araignées, bactéries, protozoaires, nématodes, coléoptères, mollusque...



Production de substrats fertiles

3. Transformer le bâti en support de biodiversité

a. La végétalisation des toitures et terrasses

Les ouvrages olympiques ont également un rôle à jouer en faveur de la biodiversité en créant de l’habitat, au sens écologique du terme. Pour des projets présentant des enjeux de densité importants, la conception paysagère et architecturale permet non seulement de limiter les effets de barrière ou de fracture mais aussi de transformer des ensembles immobiliers en supports de biodiversité. La végétalisation des toitures et terrasses joue ce rôle en contribuant à restaurer la continuité des habitats écologiques.

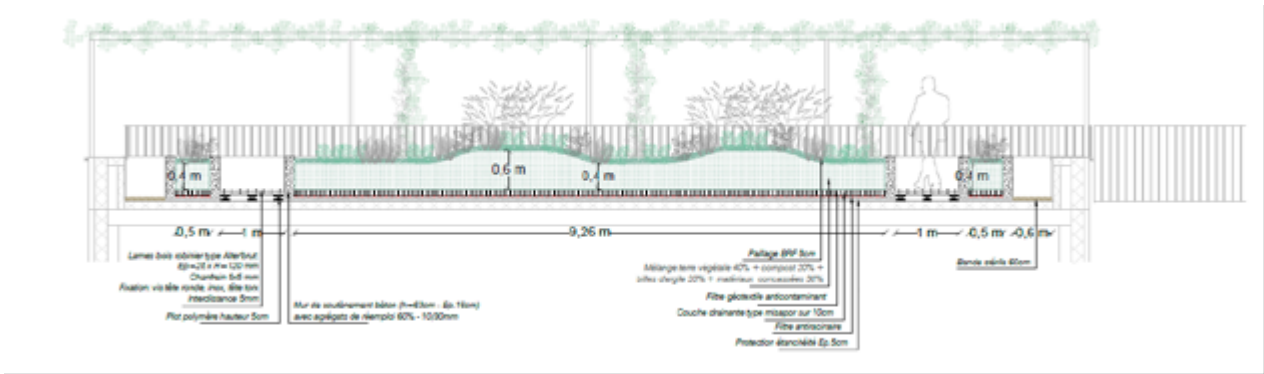
Cet axe stratégique suppose une végétalisation importante des surfaces de toitures, à tous les niveaux et pour la plupart des destinations d’usage. Ainsi, des toitures non-accessibles ont été sanctuarisées pour la biodiversité. D’autres, accessibles, sont consacrées à des usages récréatifs. Enfin certaines d’entre elles accueillent des centrales photovoltaïques.

Dans le cas des toitures équipées de panneaux solaires, les toitures biosolaires, c’est-à-dire

combinant végétalisation et panneaux photovoltaïques, sont privilégiées. Afin de garantir la richesse et la pérennité des fonctions écologiques de ces installations, des épaisseurs de substrat minimum sont définies et le choix des essences est adapté.

Au Village des Athlètes, des jardins partagés avec 80 cm de substrat ont été installés sur les toitures jusqu’au deuxième étage. À R+3 (une hauteur inférieure à 7,5 m), les toitures sont dédiées exclusivement à la biodiversité (60 cm de substrat) ou accueillent des jardins partagés (50 cm de substrat). Les toitures les plus hautes (au-dessus de R+7), pour des questions techniques de report de charge, ne sont pas en mesure d’accueillir des épaisseurs de substrats conséquentes. Elles sont dédiées à l’installation de panneaux solaires et intègrent une végétation très basse qui participe à la gestion des eaux.

Sur le Village des Médias où la végétalisation était le principal usage souhaité pour les toitures et où les bâtiments ne dépassent pas le R+7, la proportion de toiture dédiée à la végétalisation atteint 61,7%.



Coupe transversale d'une toiture végétalisée d'un bâtiment R+5 sur le secteur Universeine

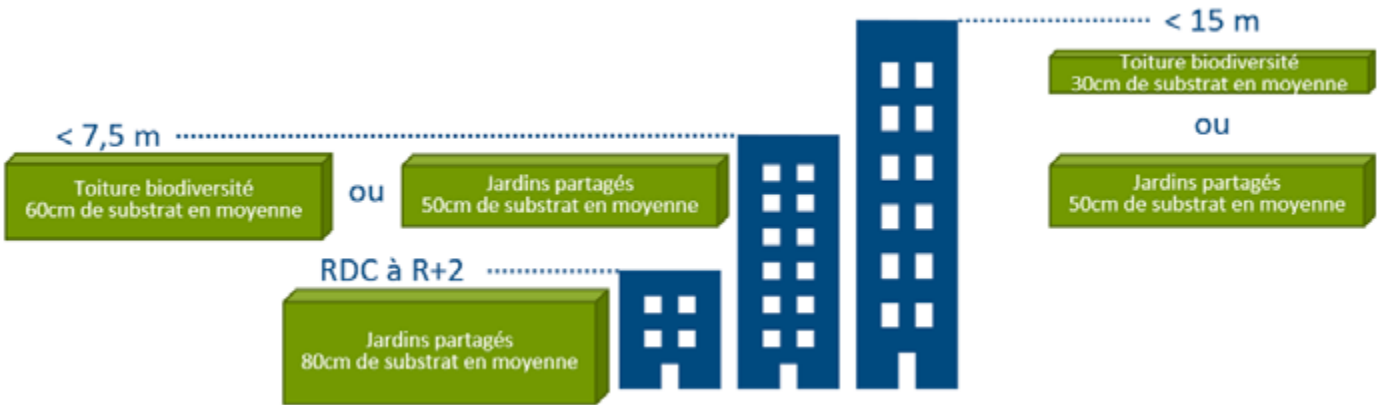
27,7%

des toitures sont végétalisées sur le Village des Athlètes (partie continentale) et 9,4% de la surface des toitures est équipée de panneaux solaires

61,7%

des toitures sont végétalisées sur le Village des Médias

Epaisseurs moyennes minimales de substrats prescrites sur les toitures des Villages des Athlètes et des Médias.



Toiture végétalisée du Village des Athlètes



Le Gymnase du Bourget : concilier biodiversité, production d'ENR et construction bas-carbone

Le gymnase Marie Paradis, construit sur le site du Bourget, est un complexe multisport et escalade réalisé en façade béton et charpente bois et comprend un bloc vestiaire tout en béton. Le gymnase est alimenté en énergie renouvelable pour la production d'eau chaude sanitaire via la mise en œuvre de deux pompes à chaleur alimentées par l'électricité produite par 234 m² de panneaux photovoltaïques en toiture, ces derniers couvrant 25% des consommations d'électricité du bâtiment.

Du fait de sa volumétrie et de sa position dans le bâtiment, la charpente de la salle omnisport s'est révélée l'ouvrage cible et adéquat pour la mise en œuvre de bois sur le projet. Ce matériau permet d'optimiser le poids de la structure tout en garantissant une portée suffisante nécessaire pour le gymnase.

Il était également prévu dans le programme de la ZAC la mise en œuvre d'une toiture végétalisée à hauteur de 60% des toitures du gymnase, avec une épaisseur de 20cm. La réalisation de cette végétalisation, combinée aux panneaux solaires en toiture a été un réel défi de conception afin d'allier une charpente bois et les charges liées aux usages prévus en toiture.

Le groupement a retenu une épaisseur de terres de 20 centimètres en moyenne sur l'ensemble des toitures. Cette proposition a fait l'objet d'une validation auprès des services instructeurs au regard de l'atteinte de l'objectif de gestion des eaux pluviales, formalisée dans

le cadre d'un Porter à Connaissance rédigée pour le suivi du Dossier Loi sur l'Eau. Au niveau de la charpente bois, il a finalement été retenu un substrat de 8 cm, sans augmenter la quantité de matériaux en structure pour absorber l'ajout de charge, compensée par une épaisseur plus élevée, de 80cm, au niveau du bloc vestiaire, réalisé en béton.

Ce traitement différencié des épaisseurs de terres en fonction des modes constructifs aura permis de créer des surfaces dédiées spécifiquement à l'accueil de la biodiversité, avec la présence d'un véritable jardin suspendu porté par un substrat de 80 cm, mieux que ne l'aurait fait une conception homogène, tout en assurant l'atteinte de l'objectif d'abattement des eaux pluviales, et la présence de végétalisation sur l'ensemble de la toiture pour rafraîchir naturellement le gymnase.

L'ensemble des réflexions menées ici autour des toitures végétalisées illustre la question de l'appropriation et de la compréhension des prescriptions environnementales : afin qu'elles soient performantes, elle se doivent d'être cohérentes et adaptées au projet, ce qui souvent nécessite de laisser de la souplesse et de l'adaptation aux concepteurs. S'il est certain que du point de vue environnemental, plus les exigences portées sont ambitieuses, meilleur le projet est, elles doivent être réfléchies et évaluées en vision globale, en s'assurant qu'elles n'entrent en contradiction ni avec la faisabilité technique du projet, ni avec d'autres prescriptions.



Gymnase du Bourget

Les essences végétales choisies sont adaptées aux conditions difficiles des toitures : exposition au vent, milieu sec d'altitude. Elles sont plus xérophiles qu'au sol, et plutôt basses pour limiter la prise au vent.



Toiture végétalisée OASIS

Sur l'Ecoquartier Fluvial, 5 540m² de toiture végétalisée ont été installés sur un dispositif de stockage et gestion des eaux pluviales dénommé Biodiverse OASIS. La mise en œuvre de cette solution permet de limiter le rejet des eaux pluviales à 0,5 L/s.ha et une rétention d'eau de 590 m³, limitant ainsi la nécessité d'arroser les espaces verts en toiture.

La solution intègre :

- des bacs de stockage d'eau de pluie en polyéthylène recyclé connectés les uns aux autres et disposés directement sur la membrane d'étanchéité ;
- des mèches de capillarité permettant à l'eau stockée de remonter pour irriguer la végétalisation ;

- un système de régulation « goutte à goutte » avec filtre pour évacuer les eaux pluviales en fonction du débit de fuite visé ;
- des plaques « Modulo » positionnées sur les bacs de rétention permettant de recevoir tout type de revêtement.

Ce dispositif permet un grand nombre d'options d'aménagement. Dans le projet, la solution permet d'accueillir, selon les bâtiments, de la végétalisation extensive, l'ancrage d'arbres, des jardinières, des gravillons, du platelage, ou des panneaux solaires dont la performance est augmentée par le rafraîchissement. Il permet d'accueillir une plus grande diversité d'espèces sur les toitures végétalisées et de recréer des trames vertes en toiture.



Toiture OASIS



Toiture OASIS

b. La mise en œuvre d’espaces refuge pour la biodiversité

La plupart des espèces animales déjà présentes sur les sites sont caractéristiques des milieux urbains et utilisent le bâti pour divers usages : nidification, gîte... Il convient dès lors que le projet intègre cette biodiversité ordinaire à sa conception.

Sur les lots promoteurs du Village des Athlètes, ce sont plus de 200 aménagements fa-

vorables à la faune qui ont été déployés. A titre d’exemple, le lot B2R du secteur Univers-seine met en œuvre 34 refuges pour la biodiversité : 13 nichoirs pour l’avifaune (cavernicole, semi-cavernicole et nicheuse), 14 gîtes à chauve-souris (pour la reproduction et pour l’hibernation), 7 refuges à reptiles et insectes. Ces dispositifs ont été complétés par des structures d’accueil et de cheminement de la faune, offrant des refuges, comme des arbres morts (issus du site) en toiture sur le projet du secteur de l’Aire des Vents du Village des Médias.



Refuges pour la biodiversité en toiture sur le secteur de l’Aire des Vents

Sur les espaces publics du Village des Athlètes, le mur en gabion de la Promenade Cesária Évora accueille sur une partie de son linéaire, à distance des usages les plus intenses, une diversité de petits nichoirs répondant aux spécificités de nidification des espèces ciblées.

Positionnés en partie haute, à au moins 3 mètres du sol, des nichoirs sont insérés ou positionnés en applique pour les espèces cavernicoles (oiseaux). Les espèces visées sont principalement les moineaux et les mésanges.

Sur la partie médiane du mur, sont intégrés ponctuellement dans les cages des systèmes de fagots de bois et bois percés. Ils reconstituent des conditions favorables aux espèces gitanant dans les tiges creuses et le bois, principalement les insectes comme les carabes.

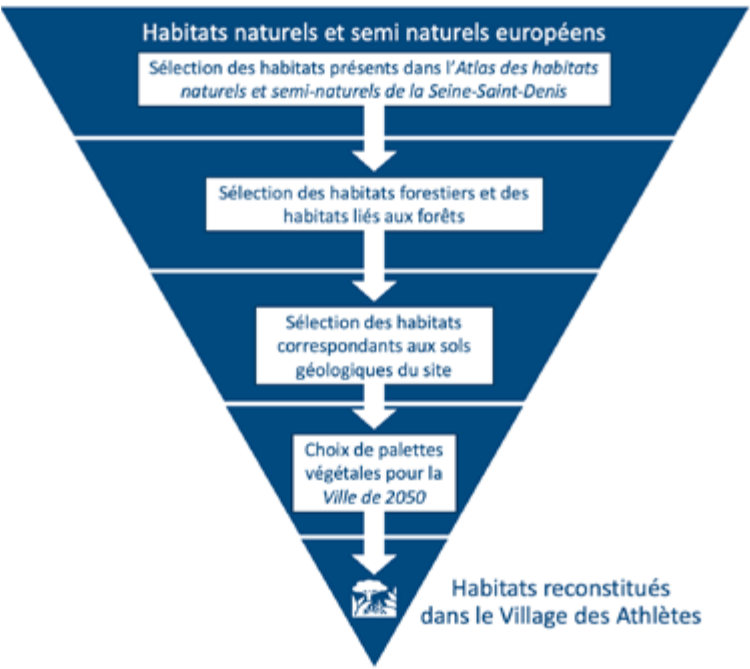
Enfin, en pied de mur, légèrement enseveli sous le sol, des aménagements enterrés permettent l’accueil d’espèces vivant dans les sols.

Sur la Promenade Cesária Évora, on peut ainsi dénombrer 58 hôtels à insectes, 20 nichoirs et 35 m² d’habitats enterrés pour insectes.



Refuges pour la biodiversité sur un mur à gabions

C. DES ÉCOSYSTÈMES RICHES ET ÉQUILIBRÉS



La SOLIDEO a généralisé sur les ouvrages olympiques, et notamment sur les espaces publics des villages et les grands ouvrages végétalisés, une approche de sélection des palettes végétales et de conception des espaces végétalisés en prenant en compte deux enjeux principaux :

- la reconstitution d’habitats adaptés au contexte et aux espèces cibles ;
- le choix de palettes végétales adaptées aux contraintes de la ville à l’horizon 2050.

Clé de détermination des habitats

1. La reconstruction d'habitats cohérents

Les objectifs recherchés par la SOLIDEO lors de la conception des espaces vont au-delà d'un verdissement de l'espace et de la recherche de services écosystémiques immédiatement obtenus comme le rafraîchissement de l'espace. La SOLIDEO a recherché la reconstitution d'un écosystème, avec des habitats adaptés aux espèces locales, telles qu'identifiées dans le cadre des études réglementaires. Ces habitats assurent un rôle de zone de refuge mais également de ressource alimentaire diversifiée et adaptée à la faune locale. Ils contribuent également à rétablir des corridors écologiques.

Les habitats cibles ont été déterminés en fonction des inventaires floristiques et faunistiques réalisés sur site et à proximité. Pour chacun d'eux, ont été identifiés les caractéristiques des sols et les palettes végétales indigènes. Puis, on étudie les fonctionnalités de ces habitats dans la ville

et leur capacité d'adaptation au changement climatique. Cette démarche complète vise à reconstituer des habitats en cohérence avec le territoire et adaptés à la ville de 2050.

La méthodologie s'est appuyée sur le savoir des organismes experts, conservatoires et observatoires botaniques qui répertorient les habitats. Leur connaissance a permis de veiller à ce que les habitats projetés soient cohérents et respectent l'histoire géologique et biogéologique des lieux. L'Observatoire Départemental de la Biodiversité Urbaine (OBDU) et le Conservatoire Botanique National du Bassin parisien (CBNBP) ont ainsi contribué à l'intégration d'habitats naturels au sein des espaces publics du Village des Athlètes et du Village des Médias. La conception s'est notamment appuyée sur l'Atlas des habitats naturels et semi-naturels de la Seine-Saint-Denis de l'OBDU et du CBNBP.



Habitats reconstitués dans les espaces publics du Village des Athlètes

Légende

- Chênaie sessiliflore

Ormaie rudérale
- Chênaie-Frênaie

Chênaie jardin

a. Des certifications pour attester de l'intégration de la biodiversité dans les projets

Le label Biodiversity Construction



Lancé par le CIBI (Conseil International Biodiversité Immobilier) en 2012 le label BiodiverCity ® concerne tous les projets d'urbanisation sur des sites urbains, périurbains ou naturels. Ce référentiel prend tout son sens pour les opérations visant un niveau d'excellence en termes de construction durable et d'écologie, en particulier lorsqu'elles sont destinées à accueillir des usagers et comprennent des espaces extérieurs importants.

Le label permet d'évaluer la prise en compte de la biodiversité dans les projets immobiliers. Il promeut la conception et la construction de bâtiments qui donnent une place importante à la nature en ville. Il complète les certifications internationales (BREEAM® LEED® et HQE™) qui intègrent la question de la biodiversité sans faire l'objet d'une évaluation approfondie.

Le label s'appuie sur une approche multicritères organisée autour de 4 grands axes :

- engagement, relevant du maître d'ouvrage : Mener une stratégie biodiversité adaptée au projet immobilier ;
 - moyens mis en œuvre, relevant de la maîtrise d'œuvre : Concevoir une architecture écologique ;
 - évaluation des bénéfices écologiques, demandant l'intervention d'un écologue : Optimiser le potentiel écologique du projet par rapport à son contexte urbain, périurbain, rural ;
 - bénéfices pour les usagers : Développer les services rendus, pour le bien-être des usagers
- Chaque axe est indépendamment noté de « A » à « E », le « A » représentant l'excellence dans le traitement des préoccupations de l'axe. Le label s'obtient à partir du moment où l'un des axes obtient un A et qu'aucun autre n'est noté en D ou E. Les niveaux suivants sont

donc disponibles : Base, avec un A sur d'un des axes ; Performant, avec deux A ; Excellent, avec 3 A ou plus.

L'obtention du label BiodiverCity nécessite la validation de deux audits distincts :

- Le premier audit, appelé Conception, vise à démontrer, par des preuves documentaires, que les critères biodiversité ont été pris en compte.
- Le second audit, appelé Livraison, consiste en la remise d'un livrable composé de photos prises lors d'une visite de site et des preuves d'intégration des critères biodiversité dans les DOE.

La labellisation Biodiversity Construction a fait partie des exigences du Cahier des Prescriptions d'Excellence Environnementale de la SOLIDEO sur les constructions neuves. Le tableau ci-dessous récapitule les résultats des premiers audits réalisés phase conception. Sur le Villages des Athlètes, les audits Livraison seront délivrés en phase héritage.

Ouvrages	Audit conception
Cluster des Médias - Aire des vents	BBAC
Village des Athlètes - Universeine A1, A2	AAAC
Village des Athlètes - Universeine B1, B2	AAAC
Village des Athlètes - Quinconces	En cours
Village des Athlètes - Belvédères	En cours
Ecoquartier Fluvial - PA8, PA9, PA10, PB10, PE5	En cours
Groupe scolaire de Saint-Ouen	En cours
Piscine de Marville	CBAC
Centre Aquatique Olympique	ABBC

La labellisation est également demandée sur les ouvrages en phase héritage (Secteurs B&C du Village des Médias, Secteur F du Village Olympique et Paralympique, Base mutualisée de la préfecture de Police, Groupe scolaire de Dugny).



Focus sur le groupe scolaire de Saint-Ouen

Sur le groupe scolaire Aretha Franklin de Saint-Ouen, sous maîtrise d'ouvrage de la SOLIDEO, l'obtention du label Biodivercity était également visé afin d'améliorer de manière significative la valeur écologique du site. La démarche Biodivercity a été intégrée dès l'esquisse du projet, ce qui a permis d'intégrer les préconisations du diagnostic initial du site lors des phases études et chantier. Les choix d'aménagement du projet paysager visaient à recréer des habitats naturels en faveur des espèces cibles d'Île de France identifiées lors de l'étude écologique : le rougequeue noir, la mésange charbonnière, le moineau domestique et la pipistrelle commune. Ainsi, 4 strates végétales, majoritairement indigènes, sont développées dans les espaces verts et des abris spécifiques (nichoirs, gîtes) y ont aussi été intégrés.

De manière générale, les vues sur la nature ont été valorisées lorsque cela était possible tant depuis les espaces communs que depuis les salles de classe. La disposition des espaces a permis de rendre ouvert et accessible l'ensemble des espaces verts du projet. La palette végétale est issue de l'observation des végétaux en Île-de-France. Elle est donc locale et adaptée au contexte biogéographique pour résister aux étés secs et aux hivers humides. Elle se décline selon 4 étages de végétation (arborés, arbustifs, buissonnants et herbacés) favorables à la biodiversité et présente plus de 95 % d'espèces d'origine locale référencée au label « végétal local ». L'ensemble de la palette végétale ne présente pas d'essences à risque pour la santé, le bien-être et le confort, et répond en particulier aux enjeux de non-toxicité et de prévention des troubles allergiques.

Chaque surface plantée du projet a un usage bien spécifique. La biophilie est mise en avant dès l'entrée du bâtiment avec l'aménagement d'un parvis végétalisé appelé « Square ombragé ». L'aménagement des cours élémentaire et maternelle répond aux principes des « cours Oasis » et garantit fraîcheur en été et biodiversité tout l'année. Les massifs plantés sont stratifiés et délimités par des bordures légères, la strate arborée et arbustive répond aux attentes de rafraîchissement des cours, et, dans cette perspective, des îlots ombragés



Jardin pédagogique

sont créés. Dans la cour élémentaire les îlots sont formés par des buttes et traversés par des pontons en bois. L'alternance choisie des types de feuillages et floraisons offre un aspect ludique pour le développement de la biodiversité auprès des enfants. Les pentes douces (1%) au sol permettent le stockage de l'eau et l'évapotranspiration. Sur les contours des cours se forment des lisières fleuries, propices aux pollinisateurs et refuges pour les lépidoptères.

Un jardin humide a été créé au rez-de-chaussée pour favoriser un milieu propice au développement de la faune amphibienne et la flore aquatique. L'eau de pluie est en partie utilisée pour alimenter le jardin humide par temps sec. Les strates arborée et arbustive forment un « écrin vert » dans lequel des vivaces et graminées bordent la pente douce du jardin. Cet écosystème de sous-bois humide répond aux enjeux d'apprentissage et d'observation du développement de la biodiversité par les enfants.

Un jardin pédagogique a été positionné au R+1, incitant à la découverte et à l'expérimentation. Ce jardin potager permet de responsabiliser les enfants, de les sensibiliser sur l'importance de l'environnement (utilité des plantes, gestion de l'eau/de déchets, risques liés aux pesticides, ...), de les éduquer à une alimentation saine et de les initier à la science, notamment à la biodiversité. Il est aussi d'un lieu de rencontre, de partage, et d'éducation.

Plan des espaces végétalisés du groupe scolaire



Focus sur UNIVERSEINE

L'obtention du label Biodivercity a également été demandé pour l'ensemble des lots promoteurs du Village des Athlètes. A titre d'exemple, le secteur A (secteur résidentiel à Saint-Denis) de l'opération Universeine a obtenu l'étiquette AAAC en phase conception. Conformément aux préconisations du label, la première étape sur ce secteur a consisté en la réalisation des inventaires sur site afin de caractériser les espèces faunistiques et floristiques présente sur la base d'une méthodologie d'expertise de terrain. Les habitats offerts par la végétation en présence ainsi que les taxons oiseaux, chiroptères et insectes ont été répertoriés selon un protocole précis.

L'aménagement paysager a intégré ces enjeux depuis la phase programmatique, de façon à composer dans le projet les habitats d'espèces cibles formant des réseaux trophiques :

- les insectes ;
- les oiseaux granivores et insectivores ;
- les chauve-souris (pipistrelle de Kuhl, de Nathusius et commune) ;
- et de façon plus anecdotique les reptiles et autres petits mammifères.

L'emplacement et la composition des espaces végétalisés ont été déterminés afin

qu'ils puissent correspondre aux conditions écologiques requises pour ces taxons :

- des toitures correspondant à des milieux ouverts mésophiles ou méso-xérophiles adaptés aux insectes et oiseaux ;
- des continuités arborées/arbustives étagées adaptés aux oiseaux et chauve-souris ;
- des milieux plus prairiaux pour insectes et oiseaux insectivores et granivores ;
- des milieux plus humides et ombragés en sous-bois.

L'ensemble de ces habitats doit permettre de servir de supports aux flux de déplacement, secteur de chasse et de transit et zones de nourrissage et ainsi remplir plusieurs des fonctions écologiques des espèces sélectionnées. L'évaluation de la qualité du projet s'effectue par la prise en compte des éléments suivants :

- la diversité floristique ;
- le potentiel d'enrichissement du biotope ;
- la diversité des faciès estimée à partir des différences de conditions morphologiques dans le biotope ;
- le parti-pris paysager ainsi que la nature et l'origine de la palette végétale choisie.

Le label Effinature

Développé par l'Institut de Recherche et d'Innovation pour le Climat et l'Écologie (IRICE), le référentiel Effinature® permet, sur la base d'un audit, de certifier un projet immobilier suivant trois périmètres d'application indépendants : la construction, la rénovation ou l'exploitation du bâtiment. La certification peut être attribuée à des opérations de construction neuves ou de rénovation.

Le cahier des charges de certification s'articule autour de 5 thèmes (sol, flore, faune, pollutions, sensibilisation) déclinés en exigences. Pour prétendre à une certification, l'ensemble des exigences sur l'ensemble des volets thématiques doit être atteint.

Effinature permet de s'assurer de l'application d'une méthodologie éprouvée visant à garantir un projet aux fonctionnalités écologiques intégrées et à maîtriser les risques d'artificialisation. À travers cette certification, un écologue accompagne le projet de la conception à la livraison et assure à la fois le rôle de l'AMI spécialisé, de conseil et d'évaluateur.

Le processus permettant l'attribution de la certification se découpe en plusieurs évaluations :

- une évaluation initiale en conception ;
- une évaluation définitive au stade des travaux ;
- un contrôle de conformité sur site à la réception du projet.

Dans le cadre de l'opération de modernisation du Stade Nautique du Roucas Blanc à Marseille, qui accueille les sports de voile, la certification Effinature Rénovation a été obtenue en phase réalisation, sur la base du référentiel 2018. C'est l'IRICE (Institut de Recherche et d'Innovation pour le Climat et l'Écologie) qui a délivré la certification selon une grille d'évaluation de plus de 80 critères contrôlés durant les phases de conception et de réalisation.

Cette certification a été visée afin d'assurer la prise en compte des enjeux écologiques avec comme objectifs de préserver les espaces verts existants et d'améliorer la potentialité d'accueil de la biodiversité.

Un diagnostic écologique a été réalisé sur le site de la Marina du Roucas Blanc en 2018-2019, par le bureau d'étude Biotope. Il est intégré à l'étude d'Impact du projet. Les différents inventaires ont permis d'établir la liste des espèces floristiques et faunistiques, leur niveau de patrimonialité, et la localisation des enjeux sur le site d'étude, globalement faibles au regard du contexte anthropisé et artificialisé du site.

Pour recréer des habitats naturels et semi naturels propices à l'accueil de la faune locale, le projet végétalise les sols autant que possible entre les bâtiments et autour de la voirie. Dans son objectif de reverdissement et de désimperméabilisation du site, le projet présente un coefficient de biotope CBS > 0.35, et un pourcentage de pleine terre de 21%. Les toitures terrasses végétalisées de type semi-intensives avec des plantes d'origine locale participent à la gestion de l'eau en toitures. Le projet a cherché à la conserver les arbres existants et à planter des arbres d'essences locales : 21 arbres ont été conservés, 13 palmiers ont été transplantés et 129 arbres et arbustes ont été plantés.

Conformément aux exigences EFFINATURE®, la palette végétale est locale afin d'assurer une interaction avec la faune. Les essences sélectionnées ont été diversifiées pour assurer une large gamme de ressources pour la faune et permettre une meilleure résistance au stress de l'écosystème. Les essences mellifères ont été privilégiées pour favoriser l'installation et le développement des insectes pollinisateurs. La palette végétale est composée de trois strates végétales : les grands arbres apportent de l'ombre, les massifs assurent des attraits ponctuels et cycliques, au fil des saisons et la strate basse créent des espaces de détente.

L'ensemble participe à la climatisation du lieu. Cette mosaïque alternant strate arbustive, herbacée et arborée favorise un plus grand nombre d'espèces et donc soutient un écosystème plus complexe.

2. Des habitats complexes et diversifiés

a. Les strates végétales

Une palette végétale détaillée a été définie pour chaque projet et chaque type d'habitat. Les palettes reposent sur des associations végétales connues, fondées sur les caractéristiques pédoclimatiques spécifiques. Elles se veulent complexes afin de permettre l'établissement de cycles biologiques complets.

La reconstitution des habitats ne se limite cependant pas au choix de la palette végétale.

La répartition en nombre d'espèces ainsi que leur organisation verticale et horizontale dans l'espace sont des éléments décisifs. On parle ainsi de strates végétales avec un objectif à minima de deux ou trois strates parmi les cinq (muscinale, herbacée, buissonnante, arbustive, arborée) pour chaque espace végétalisé. Les strates peuvent s'emboîter entre elles avec la présence d'arbres, arbustes et couvre-sol sur un même lieu.



Colline d'Elancourt



Focus sur le secteur QUINCONCES

Le projet paysager prévoit un grand cœur d'îlot paysager, situé au centre de tous les bâtiments, en compléments des toitures végétalisées. Cette configuration permet d'établir une connectivité d'axe ouest-est et nord-sud. Plusieurs typologies d'habitats sont proposées pour répondre aux diverses contraintes du lieu, y compris les contraintes climatiques. La palette végétale est donc diversifiée et composée de plusieurs strates :

- prairies hygrophiles : adaptées aux zones humides ;
- prairies ombre et soleil : capables de s'épanouir dans des conditions de lumière variées ;
- vivaces bois sol sec à frais : plantes vivaces adaptées aux sols secs à frais ;
- vivaces orée de bois sol sec à frais : adaptées aux lisières de bois ;
- vivaces bois sol frais : adaptées aux sols frais des bois ;
- vivaces bois sol frais à humide : adaptées aux sols plus humides ;
- arbustes odorants : apportant une dimension olfactive ;

- arbustes ombre et soleil : tolérant des conditions de lumière variables ;
- arbustes hygrophiles : adaptés aux zones humides ;
- strate arborée : incluant la plantation de nombreux arbres, inexistant à l'état initial.

C'est ainsi une forêt urbaine de 3 000m² qui est créée sur le projet avec la plantation de plus de 350 arbres de moyen et grand développement, offrant une bande arborée qui permet un ombrage et un rafraîchissement toute l'année.

Le projet inclut également des zones plus naturelles, peu voire pas fréquentées, offrant un refuge pour la faune. Ces espaces permettent de créer des habitats propices à la biodiversité, en minimisant les perturbations humaines.

Des noues sont proposées pour faciliter l'infiltration de l'eau et participer activement au cycle de l'eau. Ces aménagements permettent non seulement de gérer les eaux pluviales de manière durable mais aussi de créer des micro-habitats supplémentaires pour diverses espèces.



Cœur d'îlot Quinconces

En créant une mosaïque alternant sous-bois ouverts et fermés, l'écosystème est considérablement complexifié : la richesse floristique et faunistique augmente alors. Les niches écologiques pour la faune sont démultipliées : ressources alimentaires végétales plus variées, gîtes potentiels plus nombreux, proies plus abondantes, etc. L'écosystème s'enrichit de la diversité et acquiert une meilleure résilience face aux perturbations. L'origine géographique des végétaux est un facteur de réussite. En effet, la provenance d'un même type d'écosystème garantit une meilleure tenue des végétaux et un meilleur usage des habitats naturels.

b. L'approvisionnement en végétaux

La démarche de plantation de la SOLIDEO s'appuie sur le label végétal local, c'est-à-dire des espèces provenant de l'aire du Bassin parisien Nord- Sud et Nord-Est. L'objectif de planter local permet une meilleure adaptation des végétaux au contexte pédoclimatique et permet de créer des communautés végétales cohérentes dont les phénologies sont adaptées à celle de la faune locale : les périodes de débourrement, floraison, fructification, sont synchrones avec les cycles biologiques de la faune qui co- évoluent avec la flore. A travers cette démarche, on cherche également à

préserver les écotypes locaux, qui résultent d'une longue adaptation aux conditions locales de sol, climat et de végétation. C'est cette force génétique locale qui permettra une meilleure résilience des habitats créés face au dérèglement climatique.

Des objectifs forts ont ainsi été posés sur la provenance des végétaux sur les lots promoteurs :

- 100% des espèces plantées présentes dans la zone biogéographique
- Au moins 40% d'espèces végétales référencées par les labels « Végétal Local » et « Vraies messicoles »

Les résultats obtenus sont aujourd'hui partiels, des travaux sur les espaces verts sont encore prévus en héritage par les promoteurs du Village. Il ressort des premiers retours obtenus des difficultés d'approvisionnement en plantes labellisées « végétal local », notamment liées à la nécessité d'anticiper largement l'approvisionnement auprès des fournisseurs qui disposent du label (au moins 1 à 2 ans avant plantations). Par ailleurs, les pépinières ont été fortement mobilisées par les contrats sur les espaces publics ce qui a également saturé les capacités en fourniture.



Focus sur l'approvisionnement en végétaux des espaces publics

Sur le Village des Athlètes, la fourniture des végétaux de l'ensemble des espaces publics a fait l'objet de marchés spécifiques de fourniture. Lancés fin 2020, deux marchés distincts ont été attribués en février 2021. Le lot 1 concerne la fourniture et mise en culture de végétaux d'origine locale (végétaux indigènes), le lot 2 la réservation en pépinière d'arbres tiges, de cépées et d'arbustes en vue de leur plantation sur le village. Les deux lots ont été confiés à un groupement de pépinières françaises.



Plantation d'un chêne sur la Place des Athlètes

3. Des habitats adaptés aux espèces cibles

L'accueil de la faune urbaine est assuré par la qualité de la végétation, par les associations entre espèces et par une structuration des plantations selon des dynamiques temporelles et spatiales.

La végétation en strate permet d'accueillir une diversité d'espèces faunistiques. Les « prairies » où les strates basses sont très développées et accueillent, notamment en toitures, les oiseaux des prairies avoisinantes. Les « bosquets », où la strate arborée est beaucoup plus développée et la strate basse réduite à quelques espèces ombrophiles, proposent des habitats plus frais comme dans le Parc départemental Georges Valbon du Village des Médias.

L'exemple du Terrain des Essences

La préservation du crapaud calamite, espèce patrimoniale, est un enjeu majeur du projet du Village des Médias. La Crapaud calamite a fait l'objet d'une dérogation spéciale pour les travaux de mise en sécurité du Terrain des Essences, préalable aux aménagements. Des mesures de préservation de l'espèce ont été rigoureusement respectées, notamment le déplacement préalable des Crapauds au-delà d'une barrière anti-batraciens avant le début des travaux, assurant ainsi leur protection tout au long du processus de construction. Cette démarche a impliqué la participation active de divers acteurs, tels que l'association ANCA, des bénévoles, la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, des agents du CD93, la SOLIDEO, et d'autres partenaires encore. Notamment, les efforts de déplacement ont inclus non seulement les sujets adultes mais aussi les pontes et les têtards, avec la création de trois mares dédiées à l'accueil.



Terrain des Essences

Le secteur de compensation pour son habitat a été choisi prioritairement in situ, afin de conserver les populations sur le site. Six mesures de réduction d'impact ont donc été prises, afin de recréer des habitats reliés au Parc départemental Georges Valbon, pour que toute la population actuelle de crapauds calamites y trouve refuge. Ce sont au total 3,65 ha d'habitats qui ont été recréés en faveur de cette espèce dont notamment la création de deux mares.

Les travaux de génie écologique, concertés avec des acteurs clés tels que la DRIEAT, ont garanti la préservation de la mosaïque de milieux humides et la conformité à l'arrêté environnemental délivré. La nécessité d'une éventuelle mise à jour du dossier se pose, en vue de la gestion pérenne des espaces et des espèces au regard de la réalité de la situation post-travaux. Cela permettra de mettre sur les rails la gestion écologique future du site, favorisant le développement naturel du site, en harmonie avec le parc Georges Valbon. Ce choix stratégique confirme l'engagement envers la durabilité et la préservation à long terme de l'écosystème.

La renaturation du terrain des Essences, dont la finalisation est prévue en 2025, permet de créer un secteur de nature au sein duquel les espaces seront partiellement ouverts au public, avec des cheminements bien délimités afin de restreindre les circulations et limiter le dérangement des zones sensibles pour la faune (maintien de zones refuges au nord, cheminements surélevés, accès limité à certaines périodes de l'année, mise en place d'observatoires et d'une signalétique de sensibilisation des usagers).



Le projet de la colline d'Élancourt

Le projet de la colline d'Élancourt permet :

- la restauration de milieux ouverts bénéficiant de fauches différenciées et le maintien de lisières étagées. Les boisements, fourrés arborés et arbustifs (milieux fermés ou semi-ouverts) représentent 77% des espaces de la colline, alors que les milieux ouverts en représentent 23%, avec des prairies mésophiles principalement ;
- la préservation et l'amplification des 9 habitats naturels et semi-naturels ainsi que les 3 milieux artificiels identifiés sur le site ;
- la consolidation de zones refuges pour les espèces cibles telles que l'orobranche

pourprée dans les prairies mésophiles de la butte ou la sison anome dans les prairies mésophyles sous les pylônes EDF ;

- la lutte contre les espèces invasives grâce à la mise en place d'une palette d'arbustes, empêchant le développement de la renouée invasive (salix viminalis, caprea, rhamnus crathartica, etc.) ;

- la conservation de la totalité des surfaces de zones humides identifiées sur le site (2,69 ha) ;

- la mise en place d'une signalétique faune et flore avec 10 panneaux autour du parcours paysager pour sensibiliser le public aux enjeux de biodiversité.



Colline d'Élancourt

4. Le respect de la trame noire

L'éclairage nocturne génère une fragmentation des habitats des espèces nocturnes et une perturbation des rythmes biologiques. Les lumières artificielles entraînent des phénomènes d'attraction pour certaines espèces comme les insectes nocturnes, et de répulsion pour d'autres, réduisant leur zone de transit, de chasse ou d'habitat. Pour les chiroptères, la pollution lumineuse a un double effet : la fragmentation des habitats et la réduction de la ressource en insectes, qui attirés par la lumière, deviennent inatteignable.

Sur la ZAC du Cluster des Médias, les enjeux de la trame noire sont forts car le site est entouré d'espaces naturels non éclairés. Dans le cadre de l'insertion paysagère du Village, la préservation de trames noires entre ces espaces a été recherchée afin de maintenir la libre circulation des espèces nocturnes, notamment les espèces patrimoniales du site : le Hibou moyen duc, la Pipistrelle de Kuhl, Pipistrelle commune et Pipistrelle de Nathusius.

C'est dans cette perspective qu'ont été définis les 3 axes principaux du projet lumière :

- Préserver la biodiversité locale, dans un objectif de limiter l'impact de l'éclairage des espaces de vie nocturne sur les milieux naturels en travaillant sur le choix de matériel adapté et l'adaptation à la temporalité ;
- Limiter l'impact de l'installation avec du matériel simple et rustique ;

- Avoir une sobriété de fonctionnement en limitant les plages horaires d'allumage et en privilégiant des abaissés de puissances ou extinctions en cœur de nuit.

Afin de concilier les enjeux d'accessibilité universelle et de biodiversité, il est nécessaire que chaque espace soit catégorisé selon son usage. La lumière doit être juste spatialement et au plus près des usages, avec des ambiances nocturnes sécuritaires et confortables tout en privilégiant des temps dans la pénombre pour ne pas impacter la biodiversité.

Ainsi :

- Durant les premières heures de la nuit, la lumière répond aux exigences de l'accessibilité avec des niveaux d'éclairage réglementaires à 20 lux moyen.
- En cœur de nuit lorsque l'espace public est moins fréquenté, les niveaux d'éclairage sont abaissés. Le territoire reste cependant accessible à tout moment grâce à des systèmes de déclenchement automatisés (détecteurs de présence) qui permettent de rehausser la lumière et d'atteindre à nouveau les niveaux d'éclairage réglementaires.
- En fin de soirée, l'éclairage est réduit à son strict minimum, à un niveau de veille nocturne, pouvant être réhaussé en cas de passage d'usager.

La dualité des enjeux environnementaux et d'accessibilité a nécessité un travail sur les tonalités de lumière. Les tonalités de lumière diffèrent entre les voies RD éclairées au Sodium et la lumière sur les espaces partagés et piétons avec un mélange de blancs 3000K+2200K en début de soirée et qui tend progressivement vers du 2200K uniquement en cœur de nuit, teinte plus chaude et moins impactante sur la biodiversité.

Les modulations sont rendues possibles par la mise en place d'une télégestion généralisée ouvrant des potentiels d'évolutivité. Ainsi tous les appareils d'éclairage sont commandés à distance, tant en termes d'horaires d'allumage et d'extinction qu'en terme d'intensité lumineuse et de température de lumière.



La gestion dynamique de l'éclairage

La SOLIDEO travaille avec la Ville de Dugny sur une expérimentation de l'évolutivité de l'éclairage public. Le but est de s'appuyer le projet de suivi innovant et participatif de la biodiversité (voir page 164) pour assurer un ajustement dans le temps de l'éclairage des espaces publics. Le projet pourra expérimenter l'évolutivité des réglages en fonction des résultats du suivi de la biodiversité, par exemple en s'adaptant à la faune réellement présente ou selon les saisons.

L'expérimentation constituera aussi un terrain de recherche scientifique, visant à déceler les corrélations entre éclairage et fréquentation des lieux par des espèces. Les conditions particulières de l'expérimentation sur le Village des Médias (matériel d'éclairage hautement paramétrable, télégestion, capteurs de biodiversité, ...) font de ce projet une innovation.

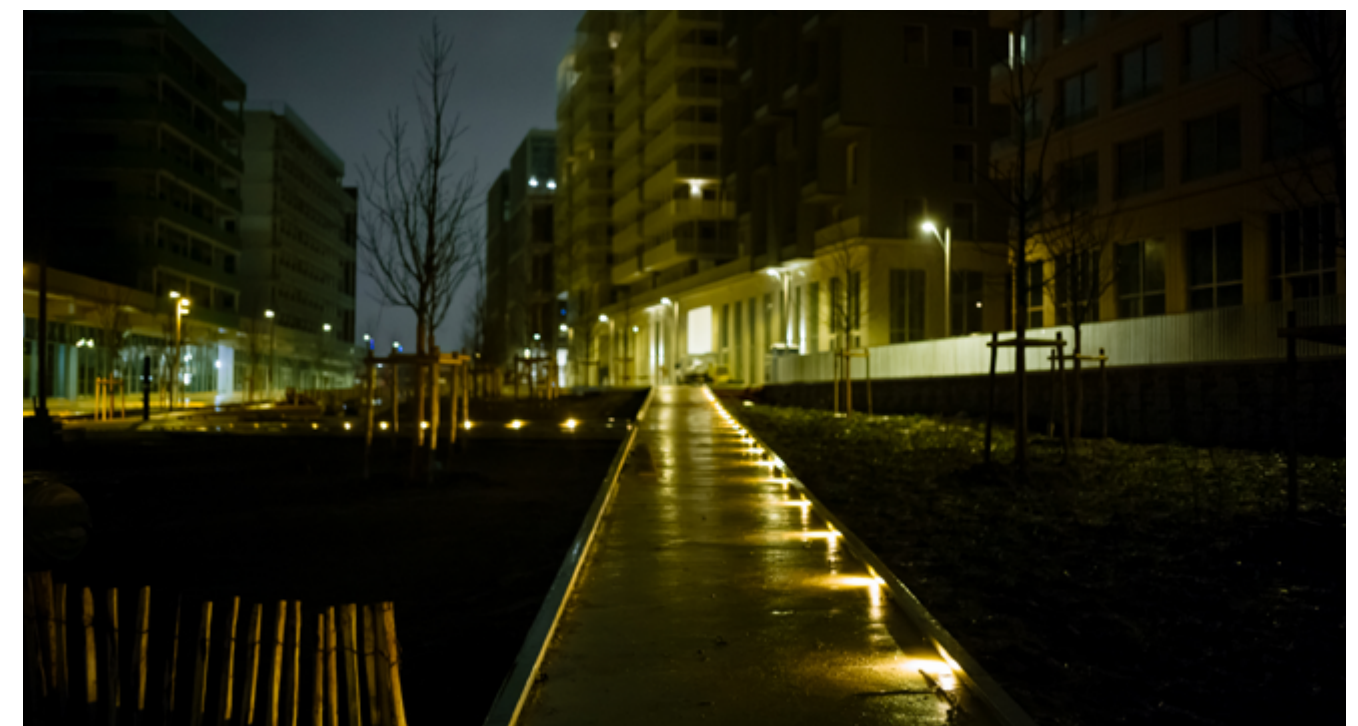


Début de soirée



Cœur de nuit

Principes d'éclairage sur le Village des Médias



Eclairage nocturne sur la Promenade Cesária Évora»

D. PÉRENNISER LES HABITATS AVEC LES GESTIONNAIRES ET LES HABITANTS

Une gestion écologique à long terme des espaces végétalisés est indispensable à la pérennisation des écosystèmes qui s'y développeront. La gestion différenciée répond à cet objectif. Elle consiste à limiter les intrants par l'absence d'engrais ainsi que l'arrosage après la reprise des végétaux. Enfin, elle assure une gestion de la ressource naturelle en valorisant les déchets verts par le biais de paillage et de compostage.

Les plans de gestion différenciée sont élaborés pour être le plus simple possible pour être facilement appropriables et applicables par les futurs gestionnaires afin que les habitats soient correctement entretenus. Un contrat d'entretien est prévu par les entreprises d'espaces verts pour une durée de 2 ans suite à la remise des espaces publics sur les Village des Athlètes et le Village des Médias. Leur cahier d'entretien sera remis aux collectivités pour appropriation des pratiques de gestion.



Suivi innovant et participatif de la biodiversité

Les prescriptions environnementales et architecturales de la SOLIDEO garantissent des espaces végétalisés et des habitats de qualité au moment de la livraison des ouvrages, mais il est difficile d'anticiper l'évolution dans le temps de ces espaces sous les contraintes urbaines d'ici plusieurs années, et donc l'établissement ou non de la biodiversité. Par des consultations lancées sous la forme d'un dialogue compétitif, la SOLIDEO a visé le déploiement de solutions innovantes et durables permettant de suivre et d'évaluer l'établissement de la biodiversité sur le Village des Athlètes et le Village des Médias et d'impliquer les riverains dans la démarche.

Soutenu par le fonds Innovation et Ecologie de la SOLIDEO, le projet retenu mêle biodiversité et sciences participatives et est basé sur le suivi de la faune et de la flore, qui sera réalisé en partie par les usagers et gestionnaires des espaces verts et via la mise en place de capteurs. L'objectif est de favoriser l'appropriation des nouveaux espaces verts en phase héritage des Jeux Olympiques et Paralympiques, notamment grâce à la sensibilisation et l'implication des usagers et résidents dans le choix des stratégies de gestion de la biodiversité locale. Cette approche s'effectue via :

- le développement d'une plateforme numérique qui sera le point d'entrée pour

les citoyens et gestionnaires sur le suivi et la gestion des espaces verts ;

- le développement d'indicateurs pour le suivi de la biodiversité via les sciences participatives ;
- le suivi en continu de la biodiversité, notamment des chauves-souris, via les capteurs Leko ;
- le suivi de la fonctionnalité des sols créés sur les Villages à partir des matériaux issus de la déconstruction (technosols) ;
- l'organisation d'animations autour des programmes de sciences participatives développés sur le village auprès des habitants et riverains des Villages ;
- la participation des citoyens et gestionnaires à l'adaptation annuelle de la gestion des espaces verts en fonction des résultats des suivis écologiques et des besoins des usagers, via l'organisation d'une rencontre par an en rassemblant les parties prenantes du projet, selon le concept de gouvernance transformative.

Les Leko, munis d'un capteur qui enregistre les sons des espèces présentes dans un milieu, déterminent de façon automatique les espèces en présence via une base de données

développée par le Muséum National d'Histoire Naturelle. Ils permettent ainsi un suivi continu de la biodiversité, qui peut être évaluée à n'importe quel instant.

À ce jour, Leko permet d'identifier toutes les espèces de chauves-souris (29 espèces), 42 espèces de sauterelle, 13 espèces d'oiseaux ainsi que 10 autres espèces telles que des papillons et le ver luisant. Un processus d'amélioration en cours vise à intégrer de nouvelles espèces au dispositif, notamment des oiseaux.

Installés dès la phase Jeux, les différents capteurs permettront d'effectuer un suivi des espèces jusqu'à fin 2028 et ainsi d'évaluer l'établissement de la biodiversité dans le temps.



Capteurs de biodiversité sur un mât au sein du Village des Médias



SYNTHÈSE

Le présent document constitue un bilan en date de septembre 2024 sur la mise en œuvre de la stratégie d'Excellence Environnementale de la SOLIDEO. Les orientations de la stratégie environnementale adoptées lors du conseil d'administration de la SOLIDEO du 16 octobre 2018 ont guidé la conception des ouvrages olympiques et paralympiques :

Les ouvrages s'inscrivent dans une trajectoire de neutralité carbone à horizon 2050, sur tout le cycle de vie du quartier et du bâtiment

Les objectifs sont atteints, avec des émissions carbone inférieures de près de moitié à celles du scénario de référence correspondant aux normes actuelles, notamment sur le projet du Village des Athlètes.

Les ouvrages olympiques participent pleinement à la massification de la construction bas carbone. Les conditions opérationnelles et économiques liées à l'usage du bois et des matériaux biosourcés ont conduit à des choix constructifs adaptés à la programmation de chaque projet. L'ambition s'accompagne également de l'utilisation importante du béton dit « bas carbone », bien que les défis opérationnels d'utilisation fassent encore l'objet d'études. Sur le plan énergétique, des objectifs de sobriété ambitieux ont été généralisés et la plupart des ouvrages ont recours aux énergies renouvelables, à la récupération de chaleur et au développement d'installations photovoltaïques.

Une démarche ambitieuse de réemploi et de recyclage en lien avec la déconstruction des bâtiments existants et la promotion de l'innovation a été mise en place.

Le confort urbain en 2050 est assuré, malgré un climat extrême et des épisodes caniculaires plus intenses et plus fréquents, grâce à une approche systématique de la résilience urbaine

Les objectifs de confort urbain sont atteints pour la grande majorité des ouvrages en climat 2050 moyen, grâce des enveloppes performantes, la généralisation des protections solaires et une ventilation adaptée.

L'enjeu du bien-être a également été pris en compte à l'échelle urbaine. La diminution des effets d'îlots de chaleur s'effectue par l'évapotranspiration permise par le développement de zones végétalisées, des revêtements adaptés et une gestion de l'eau optimisée.

La contribution positive à la biodiversité se traduit par la constitution d'écosystèmes urbains adaptés aux enjeux climatiques de 2050

En créant des écosystèmes de taille suffisante, résilients et cohérents avec les caractéristiques du paysage et l'histoire des territoires de chaque projet, les ouvrages olympiques innoveront et se distinguent des méthodes classiques d'aménagement. L'approche opérationnelle multifactorielle prend en considération le changement climatique, les dynamiques post-aménagement et le diagnostic des sols.

Les ouvrages intègrent des innovations significatives sur chacun des axes stratégiques de la stratégie environnementale

Les ouvrages olympiques mobilisent l'innovation à deux niveaux : la généralisation de procédés nouveaux, par un passage à l'échelle, et la mise en œuvre ponctuelle d'innovations de rupture. La démarche s'appuie sur la mobilisation du Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO qui permet le déploiement sur les ouvrages de nombreuses innovations en matière environnementale. Ces innovations viennent renforcer les ambitions et contribuent à faire des ouvrages olympiques une vitrine de la Ville durable.

CRÉDITS

Couverture : Ville de Paris – Guillaume Bontemps
Page 5 : Henri Garat
Page 7 : (à gauche) 1616 Prod – Stéphane Vasco (à droite) Antoine Meyssonnier
Page 8 : Paris 2024 – Raphaël Vriet
Pages 12/21/23/30/53/57/93/100/108/137/143/147/148/149/150/154/157/158/160/161 : SOLIDEO
– SENNSE - DronePress
Pages 17/26/27/29/45/51/68/87/112/117/125/131/134/151/159 : SOLIDEO – SENNSE - CBadet
Page 25 : Paris 2024-Alexis Jumeau
Page 31 : Luc Borho
Page 32 : Ville de Paris – Silvere Koulouris
Page 37 : MGP – Nicolas Grosmond
Page 38 : SOGEPROM
Pages 46/67/79/95/99/119/133/145/165 : SOLIDEO
Page 47 : Ville de Paris
Page 62 : Franck Rondot
Page 71 : Jeanne Frank DR
Page 96 : ICADE
Page 103 : Météo France
Pages 111/147 : SAS Universeine – Etamine
Pages 113/114/115 : SOLIDEO – Dassault Systèmes
Pages 116/127 : SCCV Saint-Ouen Héritage
Page 119 : RMN GP
Page 121 : Urbasense
Pages 122/132 : AQC
Page 123 : IPSL – SIRTa
Page 124 : Murmuration
Page 126 : Aldes
Page 130 : Airparif
Page 134 : Paris 2024 – Snezana maillot
Pages 138/139 : UrbanEco
Page 149 : (en haut) AQC (en bas) Pichet-Legendre
Page 162 : ON
Page 163 : SOLIDEO_Sennse_HLebrun
Page 165 : CDC Biodiversité

SOLIDEO
SOCIÉTÉ DE LIVRAISON DES
OUVRAGES
OLYMPIQUES

18, RUE DE LONDRES
75009 PARIS
www.ouvrages-olympiques.fr



@SOLIDEO_JOP



@SOLIDEOHERITAGE



Société de Livraison des Ouvrages Olympiques