

SOLIDEO
SOCIÉTÉ DE LIVRAISON DES
OUVRAGES
OLYMPIQUES

EXCELLENCE ENVIRONNEMENTALE

Bilans & Perspectives
Phase Héritage

Septembre 2025

#LesBatisseuses
#LesBatisseurs

REMERCIEMENTS

Antoine DU SOUCH (SOLIDEO)

Julie FOURNIER (SOLIDEO)

Kelly PREVOST (SOLIDEO)

Benjamin LAURENT (SOLIDEO)

Michele DOMINICI (SOLIDEO)

Kévin VASSEUR (SOLIDEO)

EXCELLENCE ENVIRONNEMENTALE

BILANS ET PERSPECTIVES PHASE HÉRITAGE

SEPTEMBRE 2025



AVANT-PROPOS D'ANNE HIDALGO	8
AVANT-PROPOS DE YANN KRYSINSKI	9
PRÉAMBULE	10
LE PILOTAGE DE L'EXCELLENCE ENVIRONNEMENTALE	13
I. TENDRE VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE	
A. DES OUVRAGES AUX AMBITIONS FORTES ET EN ACCORD AVEC LES ENGAGEMENTS DE LA FRANCE	18
B. LE BILAN CARBONE : OUTIL PIVOT POUR LA STRATÉGIE	19
1. La méthode retenue	19
2. Le périmètre du bilan carbone de la SOLIDEO	22
3. La comparaison à un scénario de référence	23
4. La définition des objectifs au travers de l'exemple des promoteurs immobiliers des deux Villages	24
C. UTILISATION DES LABELS EXISTANTS COMME LEVIERS DE PERFORMANCE	30
D. LES OUVRAGES AU RENDEZ-VOUS DES OBJECTIFS BAS CARBONE	31
1. Les résultats pour les produits de construction et équipements	31
2. Les résultats sur l'ensemble du cycle de vie	32
3. L'analogie avec la méthodologie de la RE2020	36
4. L'atteinte des labellisations bas-carbone	36
E. LES MATÉRIAUX ET DES TECHNIQUES BAS-CARBONE	38
1. Le bois sur le podium des matériaux durables	38
2. Les matériaux biosourcés et géosourcés se déclinent dans tous les lots	55
3. Le béton bas-carbone : un outil complémentaire à la réduction des émissions carbone de la construction	62
4. Des aménagements paysagers pensés pour la sobriété carbone	67
F. L'EXPLOITATION BAS-CARBONE	68
1. Viser la sobriété énergétique	68
2. Développer les approvisionnements en énergie bas-carbone	75
II. PROMOUVOIR L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE	
A. ECO-CONCEPTION ET CONCEPTION RÉVERSIBLE DES OUVRAGES OLYMPIQUES	86
1. Une candidature sobre en constructions	86
2. La réversibilité au cœur du projet du Village des athlètes	88
3. Le Centre Aquatique Olympique : un équipement multisport modulable	98
B. DES MATÉRIAUX CIRCULAIRES INTÉGRÉS À LA CONCEPTION	101
1. Des objectifs novateurs sur le réemploi	101
2. L'intégration de matériaux de réemploi dans les constructions neuves	101
C. DÉCONSTRUCTION SÉLECTIVE ET VALORISATION DES MATÉRIAUX	108
1. Dépose et réemploi des matériaux déconstruits	109
2. La valorisation des terres excavées in situ et ex situ	111
3. La valorisation du béton, des déchets de déconstruction et de chantier	113
4. Logistique optimisée et bas-carbone	114
D. PROGRAMMATION ET EXPLOITATION CIRCULAIRES DES OUVRAGES	116
1. Animer le cycle de l'eau dans les ouvrages	116
2. L'économie circulaire au service des futurs usagers	122
3. Créer les outils de l'économie circulaire du quotidien	122

III. PENSER LE CONFORT URBAIN EN 2050

A. DES OBJECTIFS QUI ANTICIPENT LE CLIMAT À 2050	126
1. Simuler le climat de 2050	126
2. Des objectifs quantitatifs pour les bâtiments	128
3. Des objectifs qualitatifs pour les espaces extérieurs	129
B. DES RÉSULTATS PROBANTS GRÂCE À UN SUIVI RENFORCÉ	129
1. Un suivi continu lors de toutes les phases de projet	129
2. Des ouvrages à la pointe des conditions de confort en 2050	130
C. LE VILLAGE DES ATHLÈTES, UN EXEMPLE : DU DESSIN URBAIN JUSQU'À LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS	131
1. Morphologie urbaine et simulations à l'échelle du quartier	131
2. Une conception bioclimatique des bâtiments	132
3. Les caractéristiques des logements : leviers de confort	133
4. Le réseau de froid indispensable à l'atteinte des objectifs	135
5. La simulation 3D : outil de vérification de la performance	136
6. Des espaces refuges dans les bâtiments et les équipements	141
7. Accompagner les usages	141
D. DES SYSTÈMES COMPLEXES POUR ASSURER LE CONFORT DANS LES SITES SPORTIFS	142
1. L'Arena Porte de la Chapelle : le choix du meilleur compromis	142
2. Le Grand Palais : compenser l'effet de serre	142
3. La couverture du court Suzanne Lenglen : la gestion du confort à ciel ouvert	143
E. ESPACES EXTÉRIEURS : LUTTER CONTRE LES ÎLOTS DE CHALEUR	144
1. Des choix de conception pour des lieux frais et confortables	144
2. La modélisation pour orienter les décisions et comprendre les phénomènes	144
3. Des solutions innovantes de lutte contre les îlots de chaleur sur le village olympique et paralympique	145
4. La captation pour confirmer les hypothèses et préfigurer de nouveaux usages	146
F. DES AMBITIONS SANITAIRES FORTES NOTAMMENT CONCERNANT LA QUALITÉ DE L'AIR	149
1. Assurer un air sain dans les logements et équipements sportifs	149
2. Des innovations pour agir sur la qualité de l'air extérieur	155

IV. FAIRE DE LA VILLE UN SUPPORT DE BIODIVERSITÉ

A. RESTAURER ET CRÉER DES ÉCOSYSTÈMES	162
B. LA BIODIVERSITÉ AU COEUR DE LA CONCEPTION URBAINE	163
1. Des continuités écologiques à toutes les échelles	163
2. Créer des sols fertiles sur site pour limiter les apports extérieurs	168
3. Transformer le bâti en support de biodiversité	172
C. DES ÉCOSYSTÈMES RICHES ET ÉQUILIBRÉS	177
1. La reconstruction d'habitats cohérents	178
2. Des habitats complexes et diversifiés	183
3. Des habitats adaptés aux espèces cibles	186
4. Le respect de la trame noire	188
D. PÉRENNISER LES HABITATS AVEC LES GESTIONNAIRES ET LES HABITANTS	190
PERSPECTIVES	193
CRÉDITS	196

AVANT-PROPOS



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 fabrication 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

AVANT-PROPOS



À l'été 2024, Paris accueillait des Jeux Olympiques et Paralympiques qui ont marqué un tournant dans l'histoire des Jeux en matière d'excellence environnementale. Plus qu'un engagement, c'est aujourd'hui une promesse tenue : démontrer que sobriété, qualité et maîtrise technique peuvent aller de pair. Les ouvrages olympiques réalisés ou rénovés ont été une vitrine mondiale des nouvelles façons de concevoir la ville européenne du XXI^e siècle : sobre, résiliente, agréable à vivre, alignées sur l'Accord de Paris.

Le dossier de candidature en main, nous avons démarré l'aventure par une feuille blanche où tout était à écrire et à inventer. Il fallait oser se fixer des ambitions aussi fortes pour construire des ouvrages olympiques répondant certes aux besoins des Jeux mais répondant surtout aux enjeux climatiques de la ville de 2050. Ce qui aurait pu être une importante source de risques a été une force car cela nous a donné la possibilité de co-construire avec les équipes et les

maîtres d'ouvrage des méthodes et des outils qui ont été spécifiquement adaptées à la nature et à la complexité de nos projets, là où d'habitude on essaie de faire rentrer un projet dans un carcan méthodologique existant. La SOLIDEO a eu le courage et l'énergie de faire l'inverse. Nous avons donc pu faire de la dentelle industrielle sur nos process, notre reporting, notre gouvernance pour être le plus efficace possible.

Si nous avons d'ailleurs pu atteindre nos objectifs, c'est avant tout grâce à une gouvernance solide et une méthodologie rigoureuse. Dès le départ, nous avons bénéficié d'un alignement politique total et d'un soutien permanent de nos tutelles et de la Délégation interministérielle aux Jeux Olympiques et Paralympiques (DIJOP). Cet engagement collectif a été un facteur clé de succès, garantissant cohérence et efficacité et dans nos décisions.

Au-delà de la livraison d'un héritage matériel durable et désirable, la mission de la SOLIDEO est de transmettre un héritage immatériel sur le savoir-faire et la méthodologie éprouvée à l'occasion des Jeux de Paris 2024, en matière de gestion de projets complexes, pour que des aménageurs, des constructeurs et d'autres porteurs de mégaprojets puissent s'en inspirer pour livrer de futurs projets dans les temps, dans le respect des budgets et toujours plus ambitieux. Ces approches pragmatiques et systémiques font aujourd'hui notre fierté. Notre retour d'expérience est très important car nous devons transformer collectivement l'essai des Jeux et pérenniser les méthodes qui ont rendu tout cela possible. Avant de titrer notre révérence, je souhaite transmettre la marque SOLIDEO.

Le présent rapport s'inscrit dans cette logique. Publié au lendemain des Jeux Olympiques et Paralympiques, sa première version dressait un premier bilan de la mise en œuvre de la stratégie environnementale. Sa mise à jour présente aujourd'hui les dernières données disponibles sur les ouvrages après leur reconversion ainsi que les premiers retours de suivi en exploitation. Plus qu'un bilan, c'est un guide destiné à être utilisé, adapté et enrichi par tous les acteurs de l'aménagement et de la construction.

Yann Krynski
Directeur général exécutif 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.

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

Consciente que ces ambitions appelaient à dépasser les standards en vigueur, la SOLIDEO a fait un choix structurant : mettre en place un Fonds Innovation et Écologie dont 36 millions d'euros sont uniquement dédiés au financement de projets novateurs.

En complément de la stratégie environnementale, et notamment de ses solutions passives, ce dispositif a permis d'explorer de nouvelles voies pour répondre à des enjeux techniques complexes. Par exemple, le recours à des structures bois a pu être envisagé et mis en œuvre malgré les contraintes réglementaires liées à la sécurité incendie, là où les solutions classiques ne permettaient pas de répondre à ce besoin.

Des approches novatrices ont pu être conceptualisées, testées et ajustées avant d'être éprouvées puis déployées à grande échelle, transformant durablement les pratiques de construction.

En soutenant des solutions prometteuses, la démarche d'innovation a également permis de relever des défis d'ingénierie audacieux, conciliant des exigences aux interfaces

complexes, à l'image des douches zéro ressaut sur planchers bois. Ces projets, aux surcoûts financés par le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO, font la démonstration de systèmes constructifs jamais éprouvés et 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 des déchets etc.

Dans des délais très contraints et dans un modèle classique d'aménagement, les ouvrages olympiques ont réussi à massifier et généraliser des procédés éprouvés à plus petite échelle, démontrant ainsi leur maturité. Si certaines innovations n'ont pu être pleinement mises en œuvre dans les délais impartis, le travail de conception réalisé offre d'ores et déjà des enseignements pour de futures réalisations.

A cette fin, un rapport de synthèse des innovations mises en œuvre sur les ouvrages olympiques a été rédigé. Celui-ci s'attache à retranscrire les fondamentaux de la démarche ainsi que les avancées permises, aussi bien techniques, que réglementaires ou encore assurantielles, ainsi que les perspectives de développement. Ce rapport est disponible ici : <https://www.ouvrages-olympiques.fr/ressources/rapport-innovations>

LIVRER NOTRE HÉRITAGE IMMATÉRIEL

Dès le lendemain des Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP), une première version de ce document constituait un bilan de la mise en œuvre de la stratégie d'excellence environnementale adoptée par le conseil d'administration de la SOLIDEO en 2018. Dans sa version héritage, le présent rapport intègre les dernières données disponibles sur les ouvrages après leur reconversion. Il documente les projets menés dans une logique de retour d'expérience pour laisser en héritage des clés de compréhension des réussites et des obstacles rencontrés autour des ouvrages olympiques.



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 de fixer, 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, en particulier sur l'analyse de la programmation des ouvrages olympiques en 2018-2019, et sur l'expertise d'un groupement d'assistance à maîtrise d'ouvrage environnementale nommé HYSPLIX (Une autre ville, Amoès, Elioth, Trans-Faire). Entre autres, ce groupement avait pour missions la rédaction des prescriptions environnementales et l'audit des différentes études - bilans carbone, simulations thermiques dynamiques, tests d'étanchéité à l'air, rapports de certifications, etc.

- rendues par les maîtres d'ouvrage à toutes les étapes de conception et à la réception.

CONTRACTUALISATION DES OBJECTIFS

La stratégie d'excellence environnementale définie par la SOLIDEO a ainsi été déclinée en indicateurs chiffrés 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 principales ambitions : budget carbone maîtrisé, confort urbain à horizon 2050, sauvegarde et valorisation de la biodiversité. Une grille d'indicateurs est annexée à la Convention d'objectifs ainsi qu'une Charte Environnementale d'Organisation et de Logistique Chantier (CEOLC).

Chaque maître d'ouvrage est responsable de l'atteinte des objectifs et la SOLIDEO s'assure au fur et à mesure de l'exécution du projet de leur bonne mise en œuvre jusqu'à la réception de l'ouvrage dans le cadre de sa mission de supervision.

Cette organisation a eu pour conséquence l'intégration dans 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 crée 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, intervenant à la fois au titre de la supervision et en appui des équipes de la SOLIDEO en maîtrise d'ouvrage. 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 etc..

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. Les différentes étapes de rendus des consultations de promoteurs immobiliers pour le Village des athlètes, comme celles des principaux ouvrages supervisés (Arena Porte de la Chapelle, Centre Aquatique Olympique, etc.) ont constitué un premier révélateur de la faisabilité technique et économique des ambitions environnementales de la SOLIDEO.

Le pôle environnemental interne de la SOLIDEO, appuyés par les responsables de programme de chacun des ouvrages, a réalisé un rigoureux suivi des indicateurs environnementaux. Lors des comités des programmes, 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.

Les données issues des réunions et des visites ont été retranscrites dans un tableau de bord dédié, permettant de suivre l'évolution des indicateurs dans le temps et en lien avec des jalons clés (édition d'un PRO, fin du gros œuvre, etc.). En cas de difficulté ou d'écart, des supports d'alerte ou d'information ont été produits à destination des différentes instances de pilotage et de gouvernance (COTECH environnementaux, comités de direction, comité d'audit, etc.). En cas d'évolution significative des objectifs initiaux,

les équipes de la SOLIDEO supervisaient par ailleurs la rédaction de fiches modificatives, établissant une évolution contractuelle des engagements. Pour davantage de détails, un rapport sur les méthodologies déployées lors du parcours de livraison des ouvrages olympiques et paralympiques est disponible ici : <https://www.ouvrages-olympiques.fr/ressources/rapport-gouvernance-methodes>

Ainsi, la SOLIDEO a mis en place à toutes les phases des projets un dispositif d'échange et d'évaluation continue avec les maîtres d'ouvrage, en particulier avec les promoteurs immobiliers de deux Villages, ce qui a permis d'anticiper certaines difficultés et de lever collectivement les verrous identifiés. Ces échanges quasi-quotidiens ont mobilisé à cet effet de nombreux acteurs dont les contributions en partenariat avec la SOLIDEO participent à son héritage immatériel.

EVALUATION FINALE ET RETOUR D'EXPIRIENCE

Par ce suivi rigoureux et par le travail de la SOLIDEO en étroite collaboration avec les maîtres d'ouvrage, la vérification de l'atteinte des objectifs environnementaux a été anticipée, à la fois lors de la réception en phase jeux et de la réception en phase héritage, ce qui a permis de la maîtriser finement.

À partir des données collectées lors de ces évaluations, la SOLIDEO a travaillé à la capitalisation des retours d'expérience et à la valorisation des 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 : <https://www.ouvrages-olympiques.fr/ressources>



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, 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.

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.

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. La méthode retenue

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.

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 encore 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. Les calculs carbone sont ainsi réalisés en méthode statique. 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 de modulation des seuils de performance.



Tuiles de la Halle Maxwell

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.

2. Le périmètre du bilan carbone de la SOLIDEO

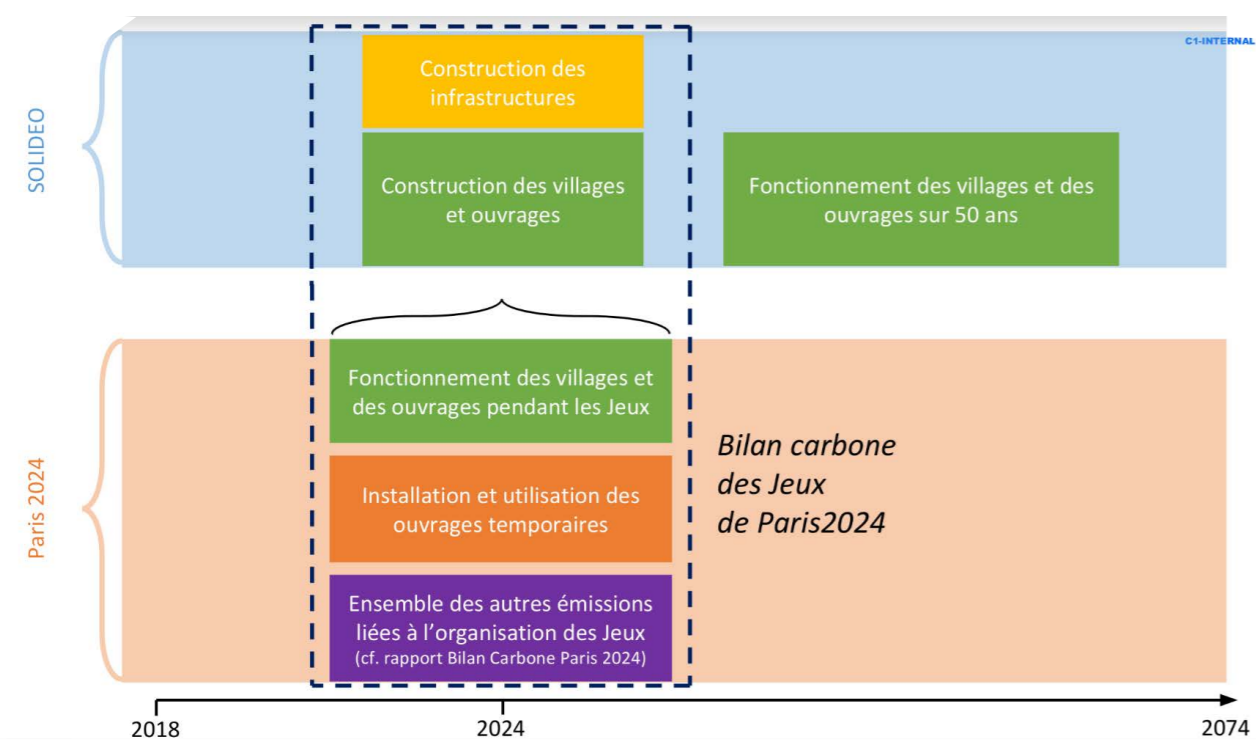
Le périmètre du bilan carbone global correspond à 62 opérations supervisées par la SOLIDEO, là où la SOLIDEO en a supervisé 70 au total. Ajoutées plus tardivement dans le programme olympique, ces 8 opérations supplémentaires ont principalement fait l'objet de subventionnements forfaitaires et d'un suivi calendaire renforcé. La nature de leurs travaux n'étant pas dimensionnante d'un point de vue environnemental et compte-tenu du calendrier tardif de leur intégration, elles ne figurent pas dans le cadre du présent bilan carbone consolidé. Par ailleurs, elles ne représentent que 0,5% de la maquette financière de la SOLIDEO.

Les ouvrages sont organisés selon leur typologie ou leur localisation, ce qui permet dans la suite de ce document de réaliser des analyses qualitatives spécifiques selon les typologies d'opération, de manière à en tirer des conclusions et tendances scientifiques selon des hypothèses similaires. Les catégories de typologie retenues sont les suivantes :

- Le Village Olympique et Paralympique (lots immobiliers et espaces publics) ;

- Le Village des médias (lots immobiliers et espaces publics) ;
- L'Écoquartier Fluvial (lots immobiliers et espaces publics) ;
- Les piscines ;
- Les équipements sportifs ;
- Les équipements publics ;
- Les infrastructures de transport et d'énergie ;
- Les aménagements paysagers ;
- Les autres ouvrages bâtimentaires.

Le bilan carbone de la SOLIDEO prend en compte l'ensemble des ouvrages permanents réalisés dans le cadre de la préparation des JOP. Il exclut de facto tous les ouvrages provisoires prévus exclusivement pour la phase Jeux qui sont à la charge de Paris 2024. L'interface entre ces deux travaux complémentaires est détaillée dans la figure ci-dessous.



Interface entre le bilan carbone de la SOLIDEO et celui des Jeux de Paris 2024

3. La comparaison à un scénario de référence

Afin de positionner les niveaux de performance atteints par les ouvrages olympiques par rapport aux standards de la construction française, un scénario de référence a été défini en 2019 pour chaque typologie d'ouvrage et chaque mode constructif. Les valeurs de référence ainsi obtenues correspondent à l'impact carbone d'un projet standard, conforme à la réglementation thermique RT2012 mais sans effort particulier en matière d'ambitions environnementales, et permettent l'évaluation de l'atteinte des performances carbone des ouvrages.

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 HYSPLEX.

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.

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

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

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. La définition des objectifs au travers de l'exemple des promoteurs immobiliers des deux Villages

Une fois la valeur de référence définie, la stratégie carbone de la SOLIDEO s'est poursuivie par la définition d'un « budget carbone » pour l'ensemble des ouvrages olympiques et paralympiques sous sa responsabilité. En cohérence avec l'ambition portée par la SOLIDEO et le budget carbone de la candidature de Paris 2024, ce budget carbone fixe un plafond en valeur absolue en tonnes de CO2 équivalent pour chaque ouvrage.

Celui-ci a été évalué selon trois scénarios :

- Le scénario de référence, basé sur un modèle « business as usual » ;
- Le scénario bas carbone, reflétant le choix des meilleures techniques disponibles ;
- Le scénario médian, correspondant à un optimum idéal entre performance environnementale et faisabilité technico-économique.

Les principales différences entre ces scénarios sont liées au choix des matériaux et produits de construction, au niveau de performance énergétique et à la nature de l'approvisionnement énergétique (chaleur et électricité). Ces scénarios ont servi de base de discussion avec les différentes maîtrises d'ouvrages et opérateurs, puis ont été contractualisés au travers des Conventions d'objectifs tels que :

- L'objectif socle correspond à la projection du budget carbone dans l'hypothèse médiane : il représente le niveau d'émission maximal à ne pas dépasser ;
- L'objectif innovant correspond à la projection du budget carbone dans l'hypothèse bas carbone : il représente la cible idéale à viser pour se rapprocher de l'objectif de neutralité carbone de la SOLIDEO.

En fonction des spécificités du projet et des leviers disponibles, ainsi que des modifications programmatiques au cours des études et des travaux, la réduction entre l'objectif socle et le scénario de référence varie entre 10%

(infrastructures, aménagements paysagers) et 50% (lots immobiliers du Village Olympique et Paralympique, Centre Aquatique Olympique). Le budget carbone alloué à chaque ouvrage correspond, le plus souvent, à l'hypothèse médiane.

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, des scénarios cibles ont été décrits par la SOLIDEO et étudiés par sa maîtrise d'œuvre urbaine tels que :

- R+1/R+3 : planchers bas 80% béton bas carbone, 20% béton standard, autres planchers bois, façades bois. Le scénario cible permettait 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 permettait de réduire les émissions de carbone de la construction de 50% pour les bâtiments résidentiels et de 44% pour les bâtiments non résidentiels par rapport au scénario de référence.
- R+9 : planchers, façades et infrastructure en 50% béton bas carbone et 50% béton standard, poteaux/poutre/noyau en béton

standard. A partir de cette hauteur, et plus généralement pour les bâtiments dont la hauteur du dernier plancher est supérieure à 28 mètres, l'application 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.

Ces scénarios cibles projetaient de réduire les émissions de carbone de la construction des bâtiments résidentiels et non résidentiels respectivement de 30% et de 27% par rapport au scénario de référence.

Concernant le volet énergétique, les scénarios cibles prenaient en compte à la fois la performance énergétique des bâtiments, et donc l'estimation de leurs consommations en phase exploitation, 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.

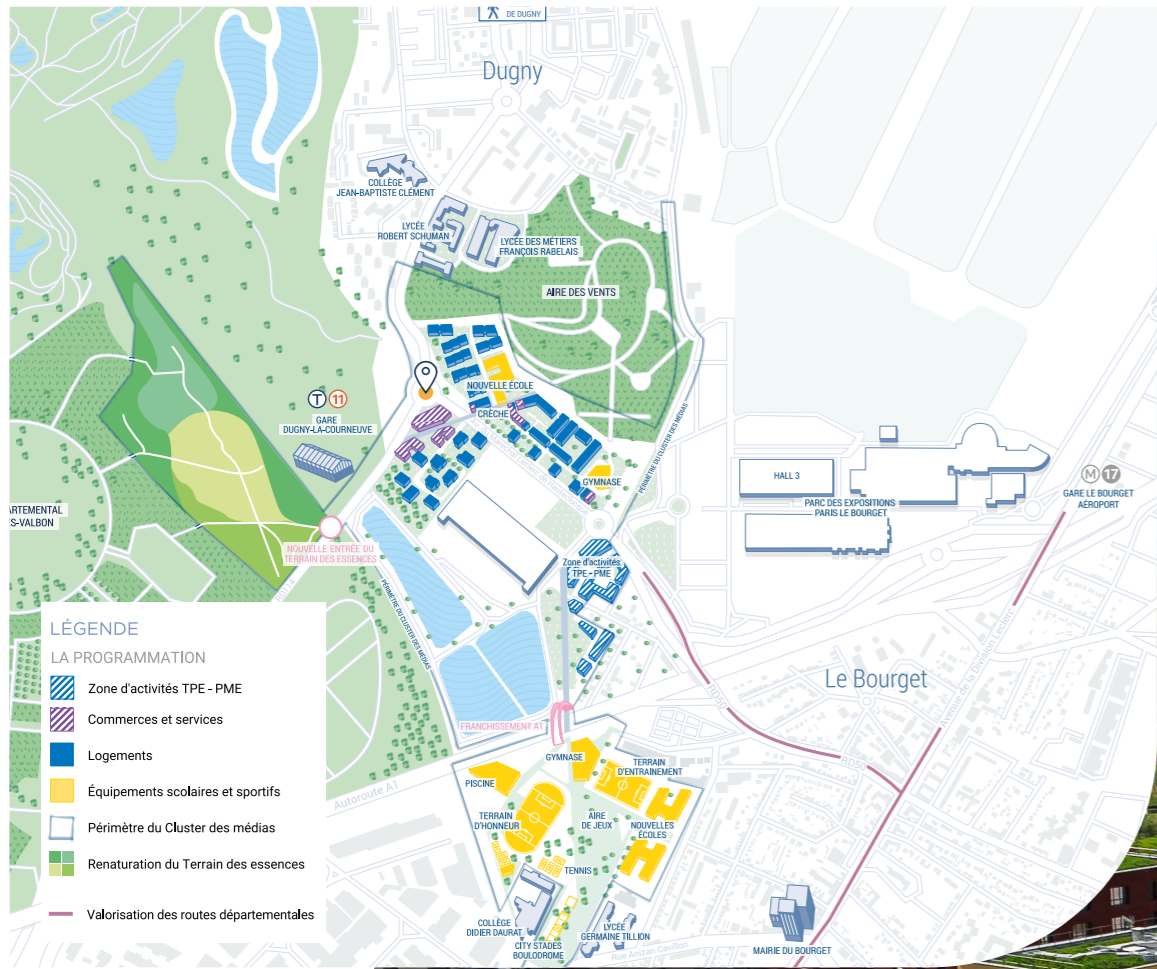
Scénarios de consommation et approvisionnement énergétique du Village

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%



Cartographie du Village des athlètes en héritage





Cartographie du Village des médias en héritage

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 scénarios "cibles".

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

Le bilan carbone actualisé s'appuie sur des données en grande partie définitives. En effet, 51 ouvrages disposent de données de bilan carbone finalisées et auditées en juillet 2025. A date de ce rapport, 91% du poids carbone total du bilan de la SOLIDEO est fiabilisé par des données réelles. Le reste concerne des opérations de travaux restants à finaliser et dont les réceptions auront lieu dans les prochains mois. 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 une amélioration de 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.

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

À l'échelle de l'ensemble des ouvrages, le poste produits de construction et équipements (PCE) concentre à lui seul 57 % des émissions tandis que les consommations énergétiques en exploitation en représentent 38 %. Les 5% restant sont composés des postes relatifs aux phases de chantier, de déconstruction, de mouvements de déblais et remblais ainsi que les consommations d'eau en phase exploitation.

Le tableau ci-dessous synthétise, pour chacune des typologies d'ouvrage, les résultats obtenus sur le périmètre des produits de construction et équipements. 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	30 157	-35%
Equipements sportifs	116 178	97 900	-16%
Piscines	72 533	63 762	-12%
Bâtiments	15 679	13 576	-11%
Infrastructures	60 953	47 506	-22%
Aménagements paysagers	5 194	4 615	-11%
TOTAL	687 695	530 728	-23%

Les efforts réalisés par les maîtres d'ouvrage et leurs entreprises ont ainsi permis d'éviter, pour la construction des ouvrages olympiques, 23% 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.

La réduction du poste PCE, principal poste de la phase construction, atteint -30 % pour le Village Olympique et Paralympique et -19 % pour le Village des médias. Ces résultats s'expliquent par plusieurs facteurs. Les quartiers ont été conçus selon des principes bioclimatiques, avec une attention portée à la compacité des bâtiments, favorisant ainsi leur performance énergétique et leur autonomie. Une sobriété dans l'usage des matériaux a également guidé les choix architecturaux.

La mise en œuvre à grande échelle de matériaux biosourcés, notamment le bois en superstructure, a contribué de façon significative à la réduction des émissions du poste PCE. Ce recours au bois a été complété par l'emploi de formulations de bétons bas carbone en infrastructure comme en superstructure, chaque fois que cela était techniquement possible. Enfin, la disponibilité

croissante de données environnementales individuelles a permis de consolider les choix techniques et d'améliorer la fiabilité des estimations des gains environnementaux.

Les équipements publics, regroupant notamment tous les établissements d'enseignement, affichent le gain le plus élevé avec une réduction atteignant -35 %. Ce différentiel s'explique en partie par des scénarios de référence intégrant des marges d'incertitude au regard de la définition tardive des programmes. Il est également la traduction d'une conception environnementale ambitieuse et d'une exécution réussie des ouvrages scolaires du programme olympique. Les aménagements paysagers, hors ZAC, ne présentent qu'un gain de -11 % à réception, bien en deçà des 30 % estimés en conception. Cet écart s'explique par une meilleure exhaustivité des bilans réalisés à la réception, ces derniers intégrant des postes souvent sous-estimés en amont, voire non-comptabilisés, tels que les volumes de déblais/remblais, les travaux de dépollution ou encore les opérations de défrichage et les consommations des engins de chantier. D'autant que les aménagements paysagers font partie des opérations pour lesquelles les bilans carbone sont aujourd'hui non réglementaires et très peu réalisés.

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.

Bilan carbone sur l'ensemble du cycle de vie des ouvrages

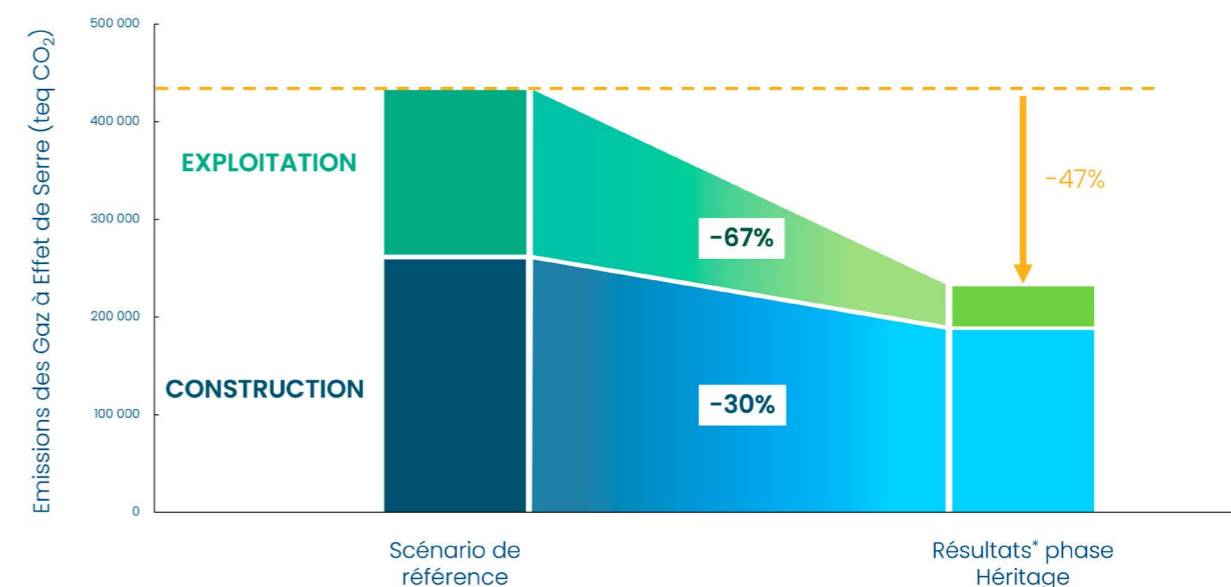
Typologies d'ouvrage	Bilan carbone de référence (tCO ₂ eq)	Bilan carbone du projet (tCO ₂ eq)	Gain projet/référence
Village Olympique et Paralympique	430 720	244 157	-43%
Ecoquartier Fluvial	96 542	68 051	-30%
Village des médias	124 906	82 273	-34%
Equipements publics	72 956	42 448	-42%
Equipements sportifs	247 897	184 537	-26%
Piscines	393 295	258 565	-34%
Bâtiments	18 573	15 796	-15%
Infrastructures	66 273	51 574	-22%
Aménagements paysagers	8 139	6 625	-19%
TOTAL	1 459 300	954 025	-35%

Ces résultats, en particulier le Village Olympique et Paralympique 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 ont été réalisés 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.

Représentation du bilan carbone du Village Olympique et Paralympique sur 50 ans



Ces gains en matière de carbone, qui s'ajoutent à ceux obtenus via le volet PCE, résultent d'une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, de l'installation d'équipements et de systèmes énergétiques performants, ainsi que d'une attention particulière portée à la qualité des travaux de rénovation des sites sportifs et des piscines.

De nombreux ouvrages ont été raccordés à des réseaux de chaleur à faible empreinte carbone, qu'ils soient déjà existants ou spécialement créés pour l'occasion, et des panneaux photovoltaïques ont été installés en toiture afin de renforcer la production d'énergie renouvelable.

Le bilan carbone global de l'ensemble des ouvrages est présenté dans le tableau ci-dessous. Il détaille également les émissions liées aux produits de construction et équipement et à l'énergie.

Bilan carbone de l'ensemble des ouvrages

Ouvrages	Bilan global (tCO ₂ eq)	dont PCE (tCO ₂ eq)	dont Energie (tCO ₂ eq)
Espaces publics du Village Olympique et Paralympique	24 147	18 900	484
Lots immobiliers du secteur Quinconces (D) du Village Olympique et Paralympique	52 996	36 048	12 824
Lots immobiliers du secteur Belvédères (E) du Village Olympique et Paralympique	55 247	37 398	13 635
Lots immobiliers du secteur Universeine (A&B) du Village Olympique et Paralympique	107 627	76 719	24 186
Résidence étudiante (E4b) du Village Olympique et Paralympique	4 141	2 421	1 428
Groupe scolaire de Saint-Ouen-sur-Seine	4 002	3 301	665
Groupe scolaire de Saint-Denis ²	6 180	4 545	1 579
Gymnase Pablo Neruda	3 445	2 110	1 240
Grande Nef de l'Île-des-Vannes	5 593	4 869	512
Base de la Préfecture de Police	4 073	1 912	3 061
Lycée Marcel Cachin	14 885	11 659	2 840
Espaces publics de l'Écoquartier Fluvial	8 552	6 587	871
Lots immobiliers (PA PB et PE) de l'Écoquartier Fluvial	59 499	39 068	19 074
Franchissement de l'Île-Saint-Denis	10 200	9 400	Non concerné
Enfouissement des lignes haute tension	7 999	7 028	Non concerné
Dragage du petit bras de la Seine	1 430	1 430	Non concerné
Mur anti bruit A86	660	650	Non concerné
Echangeurs A86-A1	11 848	11 848	Non concerné
Espaces publics du Village des médias	13 956	11 074	444
Lots immobiliers du secteur Aire des Vents (A) du Village des médias	31 060	20 895	7 660
Lots immobiliers du secteur Plateau (D) du Village des médias	37 257	24 102	9 845
Groupe scolaire de Dugny	4 253	2 751	1 432
Équipements sportifs Le Bourget	435	397	37
Gymnase du Bourget	2 583	1 880	588
Franchissement A1 Le Bourget	1 121	676	Non concerné
Terrain des Essences	1 038	1 038	Non concerné
Ecoles du Bourget	7 719	5 591	1 825
Hall 3	15 796	13 576	1 877
Piscine de Marville	23 169	5 320	17 697
Cheminements Marville	1 796	1 101	Non concerné
Cheminements Le Bourget	4 219	4 219	Non concerné
Stade de France	4 454	3 810	Non disponible
Canal Saint Denis	8 792	7 703	Non concerné

CAO et franchissement A1	64 426	29 010	34 070
Couverture Suzanne Lenglen	3 526	3 293	233
Arena Porte de la Chapelle	34 015	28 014	5 268
Stade Pierre de Coubertin	21 697	1 061	20 618
Abords du Grand Palais	400	400	Non concerné
Grand Palais Nef ²	13 222	13 222	Non disponible
Gymnase Max Rousié	17 580	1 793	10 356
Gymnase des Poissonniers	5 801	1 423	4 245
Gymnase Bertrand Dauvin	20 221	3 680	16 184
Piscine Georges Vallerey	39 209	3 276	34 775
Voies olympiques Paris	132	132	Non concerné
Voies olympiques Etat	892	892	Non concerné
Voies olympiques Préfecture de Police ²	110	110	Non concerné
Marina du Roucas Blanc	7 778	5 903	1 490
Stade Yves du Manoir	24 847	20 900	3 247
Stade nautique de Vaires-sur-Marne ²	20 588	19 961	Non concerné
Colline d'Elancourt	5 587	3 577	Non concerné
Piscine Maurice Thorez	3 135	3 135	Non disponible
Centre aquatique d'Aulnay-sous-Bois ²	42 346	13 183	27 996
Piscine d'Aubervilliers	22 418	6 738	14 565
Gymnase Guy Moquet	3 249	2 707	542
Piscine de Colombes ²	66 272	5 410	59 993
Complexe sportif Auguste Delaune ²	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Palais des sports de St Denis ²	13 300	2 823	10 264
PRISME (Pôle de Référence Inclusif et Sportif Métropolitain)	16 446	12 989	1 880

Pour réaliser l'ensemble de ces bilans carbone, la disponibilité et la qualité des données environnementales constituent un levier stratégique majeur. Disposer de données précises et vérifiées sur les matériaux de construction permet d'éclairer les arbitrages en phase de conception, en comparant objectivement les impacts des différentes solutions techniques. En phase de réalisation, ces mêmes données assurent une traçabilité indispensable pour vérifier la conformité entre les engagements initiaux et les produits effectivement mis en œuvre. Cette rigueur

methodologique est essentielle pour piloter la performance carbone des opérations et consolider les apprentissages pour les projets à venir.

Les Jeux ont été l'occasion de mettre en lumière des savoir-faire et des performances carbonées 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.

2- Les données des ouvrages marqués de cette note correspondent aux dernières informations de conception disponibles. À ce jour, la donnée de réception n'est pas connue de la SOLIDEO (ouvrage non réceptionné à date, information non transmise par la maîtrise d'ouvrage, etc.).

3. L'analogie avec la méthodologie de la RE2020

Plusieurs différences calculatoires entre la méthode E+C- et la RE2020 ne permettent pas de comparer strictement les résultats. Les seuils de la RE2020 ont été modulés de manière à considérer le kgeqCO₂/m² de SDP comme unité de référence, contrairement au kgeqCO₂/m² de Sref désormais utilisé. En considérant une marge d'incertitude de l'ordre de 10%, des comparaisons ont été réalisées entre les performances réelles des bâtiments et les seuils de la RE2020.

Toutes les typologies de mode constructif mises en œuvre sur les bâtiments de logements collectifs des deux villages respectent le seuil 2025. Sur le volet énergétique, tous les bâtiments respectent le seuil 2031.

Les établissements d'enseignement tendent eux aussi vers des niveaux de performance ambitieux de la RE2020. Le groupe scolaire de Dugny respecte le seuil 2025 tandis que le groupe scolaire de Saint-Ouen-sur-Seine, les écoles du Bourget et le groupe scolaire de Saint-Denis respectent le seuil 2028.

La correspondance entre la RE2020 et les objectifs de la stratégie d'excellence environnementale de la SOLIDEO est complexe et varie d'un immeuble à un autre. Ils correspondent en moyenne suivant les projets aux niveaux de la RE2020 aux échéances 2028 ou 2031, confirmant bien, pour des permis obtenus en 2020, l'objectif d'avoir 10 ans d'avance sur la réglementation.

4. L'atteinte des labellisations bas-carbone

La démarche de labellisation pouvant prendre plusieurs mois après la réception, et des travaux de réversibilité ayant eu lieu en 2025, les résultats concernant les labellisations

sont encore aujourd'hui provisoires. Les résultats finaux seront connus lors de l'analyse des données de réception des différentes opérations immobilières.

Niveaux des labellisations E+C- et BBCA sur le Village des athlètes

	Résultats E+C-	Résultats BBCA
Secteur Quinconces	<ul style="list-style-type: none"> • 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 	<p>Sur les plots bas de logement : objectifs pressentis dépassés - niveau excellence</p>
Secteur Belvédères	<ul style="list-style-type: none"> • 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 	<p>Sur la majorité des plots : objectifs pressentis dépassés - niveau performance ou excellence</p>
Secteur Universeine	<ul style="list-style-type: none"> • 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 	<p>Sur les plots bas de logement : objectifs pressentis atteints - niveau standard</p>



Couloir desservant plusieurs classes du groupe scolaire de Saint-Ouen-sur-Seine

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-sur-Seine, 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 86) ;

- l'utilisation de matériaux bas-carbone en particulier le bois, les biosourcés et le béton-bas carbone (voir page 38) ;
- la mise en œuvre de matériaux circulaires, recyclés et de réemploi (voir page 101) ;
- la sobriété énergétique et l'utilisation de sources d'énergie bas-carbone (voir page 68).

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).

Aucune exigence de quantité n'a cependant été imposée afin de laisser les 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, garantant d'une gestion durable des forêts, pour l'ensemble des approvisionnements ;
- l'interdiction des bois d'origine exotique et boréale, hors contrainte technique majeure³;
- la mise en œuvre d'un minimum de 30% de bois français.



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

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.).

3- 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 52).

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...).

Récapitulatif des volumes bois dans les constructions olympiques

Opération	Volume de bois total (m ³)	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 de Saint-Ouen-sur-Seine	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	



Cartographie des ouvrages olympiques faisant intervenir du bois en structure

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

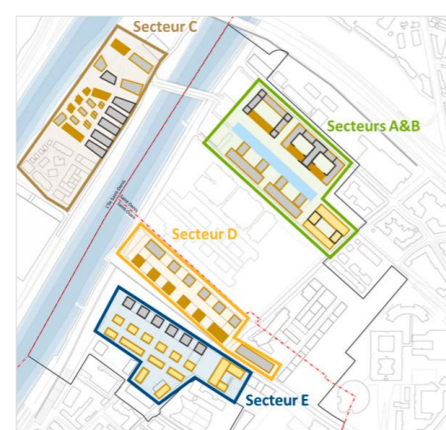
Les systèmes constructifs des bâtiments du Village des athlètes offrent une place importante au bois à la fois en structure et en habillage.

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 88).

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)



Modes constructifs
Village des Athlètes

Façades

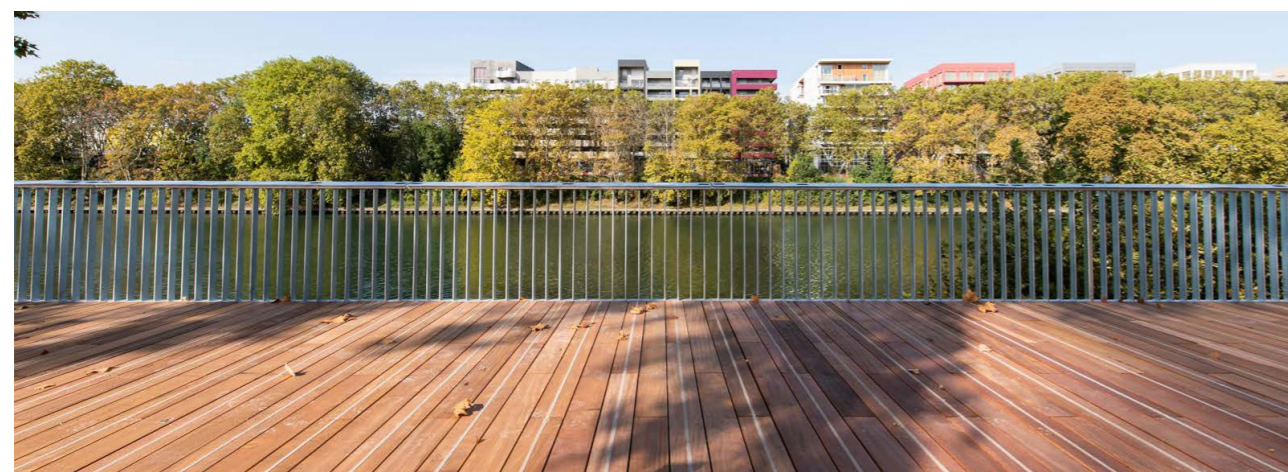


Structures poteaux/poutres/planchers



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

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.



Platelage des berges de Seine du VOP

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.



Le franchissement de l'A1 reliant Le Bourget à Dugny

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.

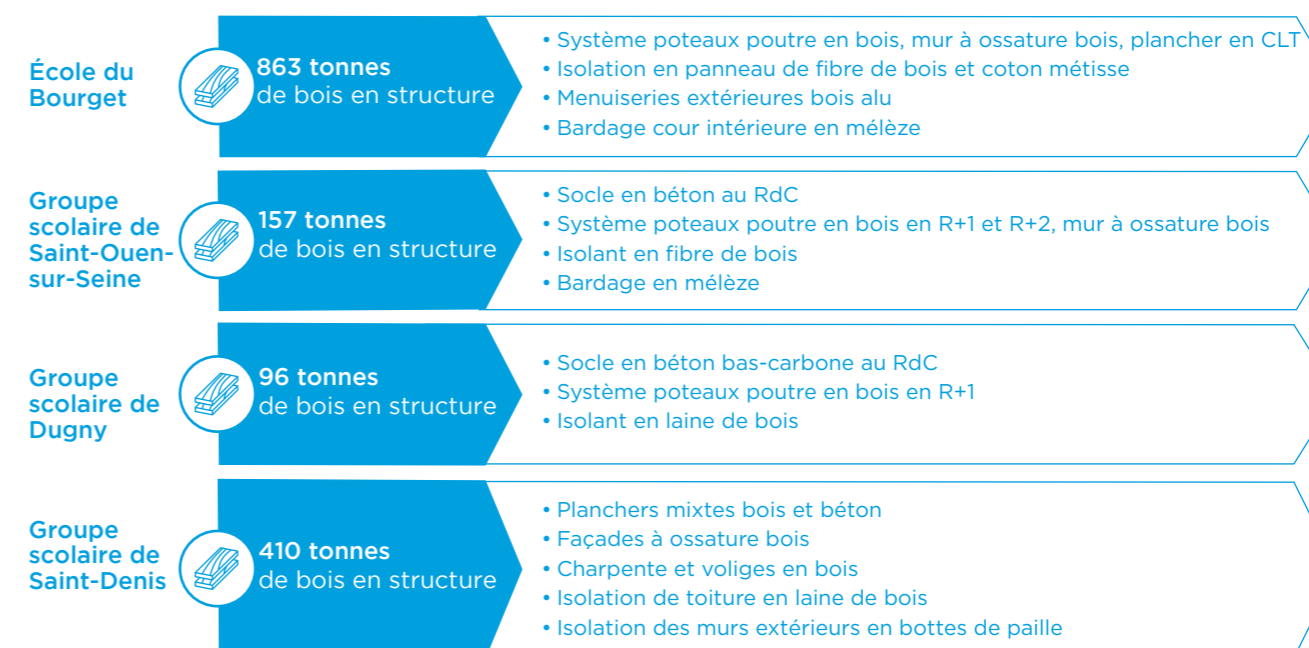


Ecoles du Bourget

Résultats du volet PCE du bilan carbone des groupes scolaires

	Bilan carbone PCE			
	Ecoles du Bourget	Groupe scolaire de Saint-Ouen-sur-Seine	Groupe scolaire de Dugny	Groupe scolaire de Saint-Denis
Source	Document de réception	Document de réception	Document de réception	Document d'étude
Résultat PCE en kgCO ₂ eq/m ² SDP	693	668	772	Le seuil 2028 de la RE2020 est atteint avec une marge de 44 kgCO ₂ eq/m SDP, ceci incombe la très large validation du seuil C1 et même C2.
Ecart au niveau C1 1 050 kgCO ₂ eq/m ² SDP	- 34%	- 36%	- 26%	
Ecart au niveau C2 750 kgCO ₂ eq/m ² SDP	- 8%	- 11%	+3%	

Modes constructifs bois des groupes scolaires



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

Le stade Yves du Manoir



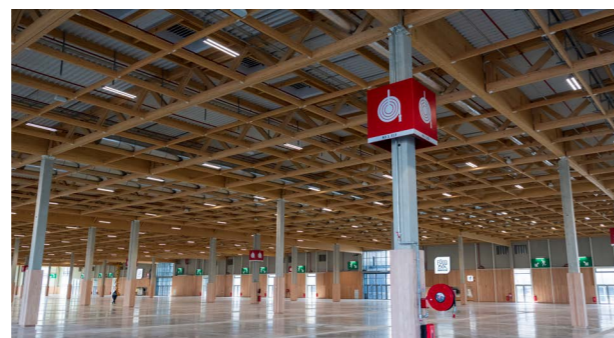
Coursive extérieure donnant sur le terrain principal du stade Yves du Manoir

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 avec des 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

Le Hall 3 du Parc des Expositions de Paris-Le Bourget



Charpente en bois du Hall 3

Le Hall 3 du Parc des Expositions de Paris-Le Bourget est un bâtiment neuf de 20 000 m² disposant d'une hauteur sous charpente de 9 m. La charpente en bois de 1 800 m³ repose sur un maillage de poteaux en béton suivant une trame 18 m x 21 m. Cette conception a permis de réduire le bilan carbone du projet de l'ordre de 15% par rapport à des matériaux conventionnels (béton, métaux). Cette charpente a été mise en œuvre en 3 mois sous hautes contraintes de sûreté liées à la proximité de l'aéroport de Paris-Le Bourget.

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 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. Il est généralement admis que la mise en œuvre de ces éléments de structure en bois a 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.

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.

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 Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (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 son inertie thermique pour le confort d'été, la légèreté du bois pour sa diminution de la charge sur les fondations et ses performances thermiques 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 kgCO ₂ eq/ m ² 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 du VOP 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 (ATEX⁴).

La SOLIDEO a ainsi engagé en 2020 une démarche de coopération avec le CSTB et avec la participation des opérateurs immobiliers. 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. Parmi ces deux guides d'aide à la conception, l'un est relatif aux ETICS et l'autre aux bardages en terre cuite et bardages métalliques.

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 € HT, 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 VOP 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 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 avec le CSTB, la SOLIDEO a en partie financé la mise à jour des deux précédents guides afin d'y intégrer les acquis et les retours d'expérience issus de la réalisation du Village des athlètes, dans un objectif de répliquabilité. Cette mise à jour s'appuie sur l'ensemble des dossiers technique d'ATEX remis par les équipes de maîtrise d'ouvrage et les entreprises afin d'en extraire les dispositions faisant consensus et des exemples de conceptions robustes apparues au Comité d'experts 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 3ème type de système de revêtement de façade largement déployé sur le Village des athlètes à base de bardage métallique.

Ces deux guides sont disponibles aux adresses suivantes : [Guide d'aide à la conception d'ETICS sur construction ou façade à ossature bois](#) et [Guide d'aide à la conception de bardages en terre cuite et bardages métalliques sur construction ou façade à ossature bois](#).

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

A la croisée des ambitions d'accessibilité universelle et d'excellence environnementale portées toutes deux par la SOLIDEO, de 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 ATEEx. 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 de l'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'ATEEx de cas B), de douches sans ressaut sur plancher bois, avec finitions en sols carrelés.

Le premier volet de l'innovation a consisté en l'accompagnement de la réalisation et de l'évaluation via une procédure d'ATEEx de cas B, de douches sans ressaut sur plancher bois sur 6 bâtiments du secteur D correspondant au total à 94 salles de bain et 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 copiloté par INGENECO Technologies et associant de nombreux partenaires 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€ HT, 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. Ce guide est disponible à l'adresse suivante : [Guide pour la mise en œuvre d'une douche accessible « zéro ressaut » dans les salles d'eau à usage individuel en travaux neufs \(supports bois\)](#)

Les verrous levés ont été les traitements des points faibles en matière d'acoustiques, de sécurité incendie, d'infiltrations d'eau liquide, de risques de condensation en cas de vacances prolongée et de non nécessité de ventilation des pléniums.

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



La charpente en bois du Centre Aquatique Olympique Métropole du Grand Paris

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 90 m de portée et 10 m à 15 m 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 permet de réduire le volume intérieur chauffé et ventilé de 30% par rapport à une géométrie horizontale.

La toiture accueille par ailleurs l'une des plus vastes centrales photovoltaïques de France sur un 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 ATEEx de cas B a été privilégiée pour fédérer 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 Île-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 photovoltaïques.



La charpente du Centre Aquatique Olympique Métropole du Grand Paris

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



Réalisation d'une dalle bois/béton

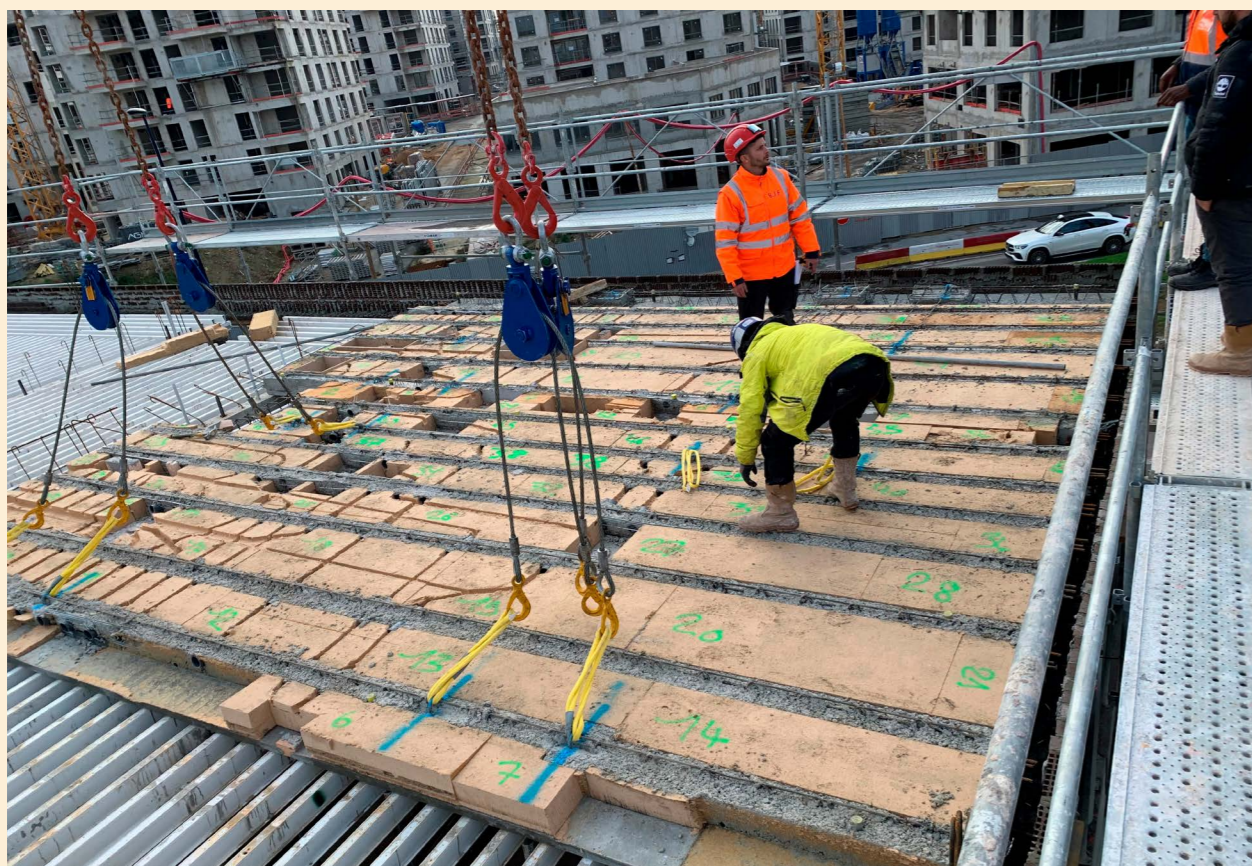
Mise en œuvre par la SAS Paysages sur le Village des médias pour un montant de 256 064€ HT, l'innovation a consisté en la réalisation de planchers intermédiaires préfabriqués « bois/béton ». Basé sur une prédalle en béton préfabriqué, ce plancher intègre de façon manufacturée, des pains de fibre de bois 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 renaient 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 points 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 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.

Obtenu 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 vivier 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 dans la construction			
Opération	Volume de bois français (m ³)	Volume de bois total (m ³)	% 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 %

Provenance du bois du Village des athlètes

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

OPÉRATIONS
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.

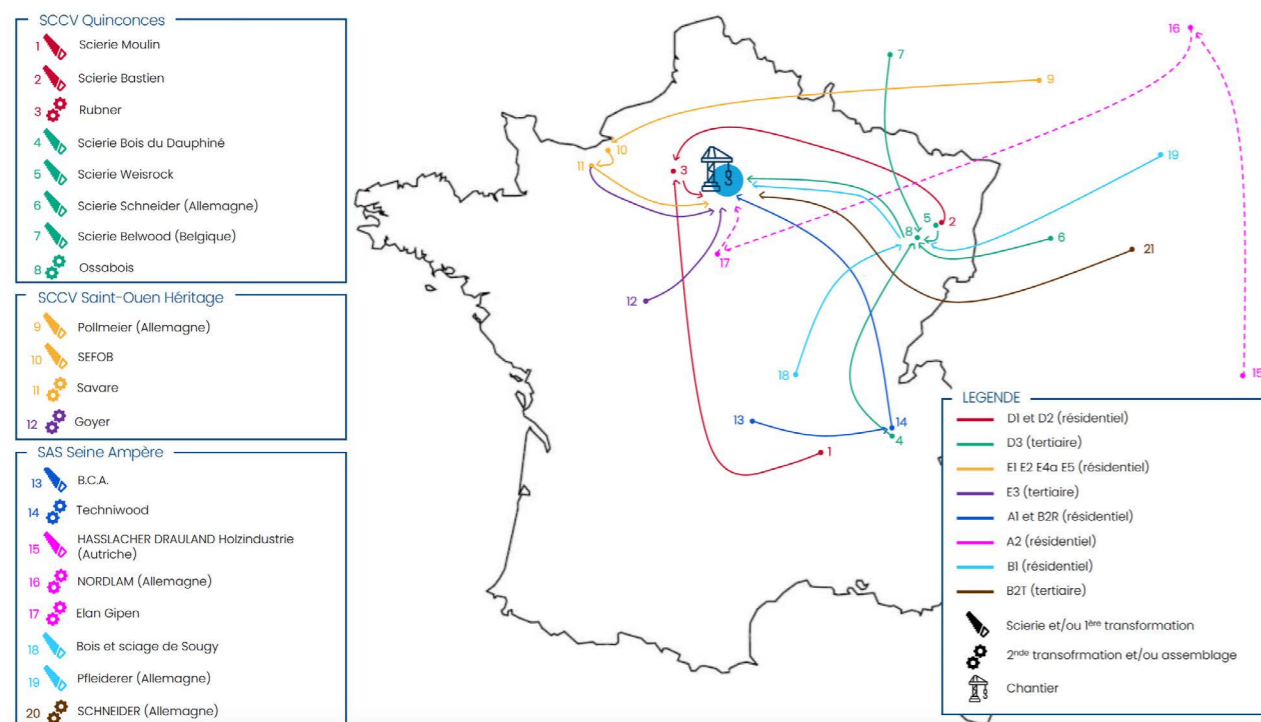
La carte ci-dessous représente l'ensemble des trajets effectués par les façades bois du Village des athlètes, hors L'Île-Saint-Denis, en faisant apparaître chacune des étapes de transformation du matériau. Elle a été établie grâce à la collecte de données issues d'un travail fin de traçabilité mené en 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.



Cartographie de la traçabilité des FOB du VOP

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 constituait 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 principaux équipements publics et sportifs et des piscines

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.

Pour la construction du groupe scolaire de Saint-Ouen-sur-Seine, 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.

Le complexe de façade ici considéré comprend un pare-vapeur, des plaques de plâtre, de l'isolant ainsi qu'un pare-pluie. L'assemblage est réalisé en hors-site. 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. Or, il existe un risque spécifique d'humidification de la paroi et de l'isolant en phase chantier dont la maîtrise est rendue plus complexe lorsque l'isolant n'est pas directement accessible. Une fois les menuiseries posées, rendant le bâtiment « fermé », ce risque est accru 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 un suivi très fin de l'humidité lors du chantier impliquant :

- 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 ;
 - le remplacement d'éléments de façades endommagés.

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.

La révision du guide méthodologique sur la gestion de l'humidité en phase chantier est portée par le CODIFAB avec le soutien du CSTB. S'appuyant notamment sur la valorisation des données issues des métrologies embarquées, comme celles mises en œuvre dans le cadre des ATEX du village olympique, cette démarche devra permettre de constituer une base de connaissances scientifiques sur la prévention des inversions de flux de vapeurs.

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.

Une isolation en bottes de paille au sein de façades bois est également prévue pour le groupe scolaire de Saint-Denis.

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 58).



Mise en œuvre de l'isolation des façades du VOP



Le béton de chanvre sur le secteur Belvédères

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.

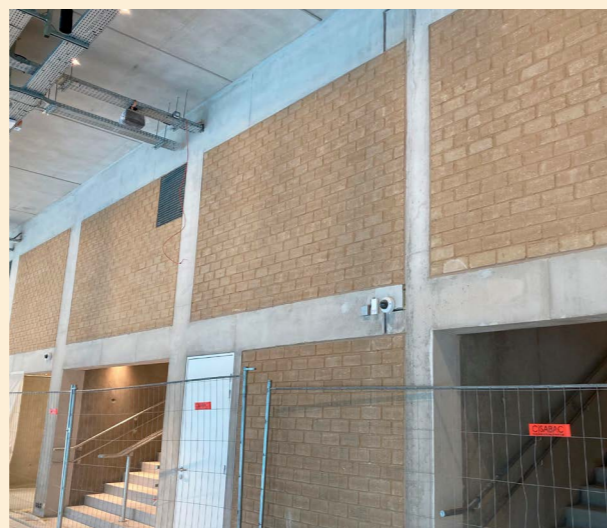


Murs en brique de terre crue dans le hall de l'Arena Porte de la Chapelle

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 crue sur l'Arena Porte de la Chapelle. Les briques proviennent de la fabrique Cycle Terre située sur la commune de Sevran, qui a malheureusement fermée 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.

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

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.



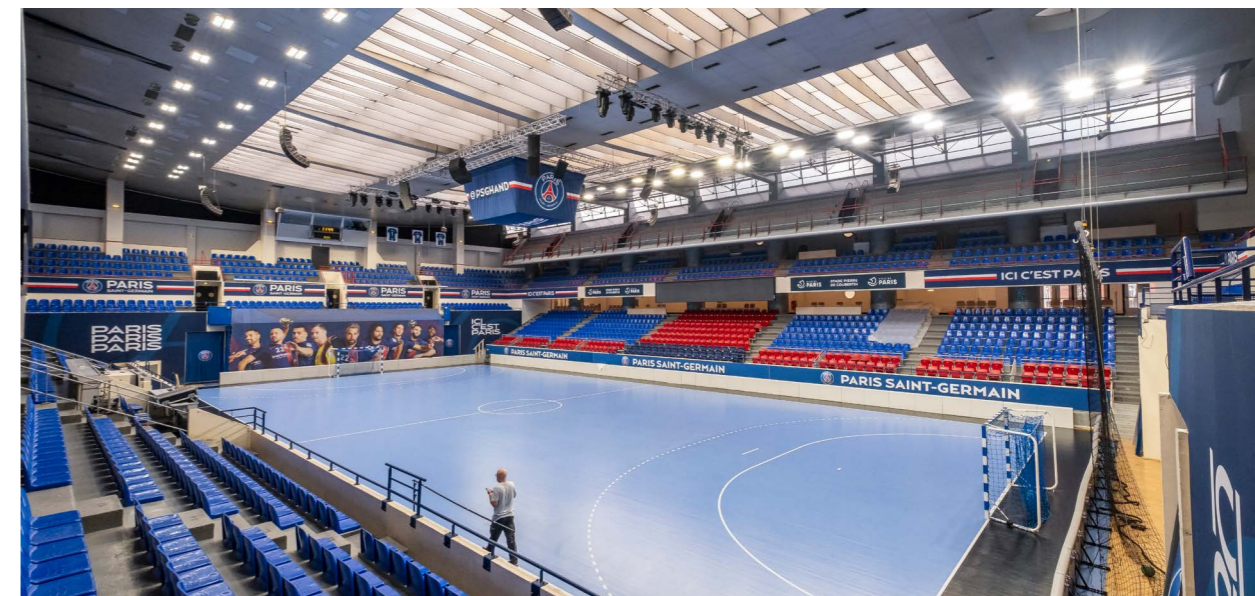
Murs en brique de terre crue dans le hall de l'Arena Porte de la Chapelle

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.



Stade Pierre de Coubertin

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-sur-Seine 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'îlot de chaleur urbain.

La piscine Bertrand Dauvin s'est quant à elle tournée vers des solutions biosourcées pour une partie de ses revêtements acoustiques aux murs et aux plafonds. Associés à des

portes en bois et un bardage bois extérieur sur la partie solarium, la réhabilitation de l'ouvrage comptabilise un taux de 6 kg/m² SDP. Ce modeste résultat illustre la difficulté d'introduire massivement du biosourcé dans les projets de rénovation, où le gros œuvre est rarement déposé, mais souligne tout de même l'intérêt de recourir à des matériaux biosourcés dans l'aménagement intérieur, et extérieur, de ses projets pour contribuer à la minimisation de leur impact environnemental. Cela étant, le taux de matériaux biosourcés n'est pas toujours l'indicateur le plus pertinent pour évaluer la contribution des solutions biosourcées dans les projets de rénovation, d'autant que le label «bâtiment biosourcé» s'applique uniquement aux constructions neuves. L'indicateur Stock C de la RE2020 permet désormais de mesurer la quantité de carbone biogénique stocké par ces matériaux, apportant ainsi une lecture plus fine de leur impact environnemental.



Piscine du centre sportif Bertrand Davuin

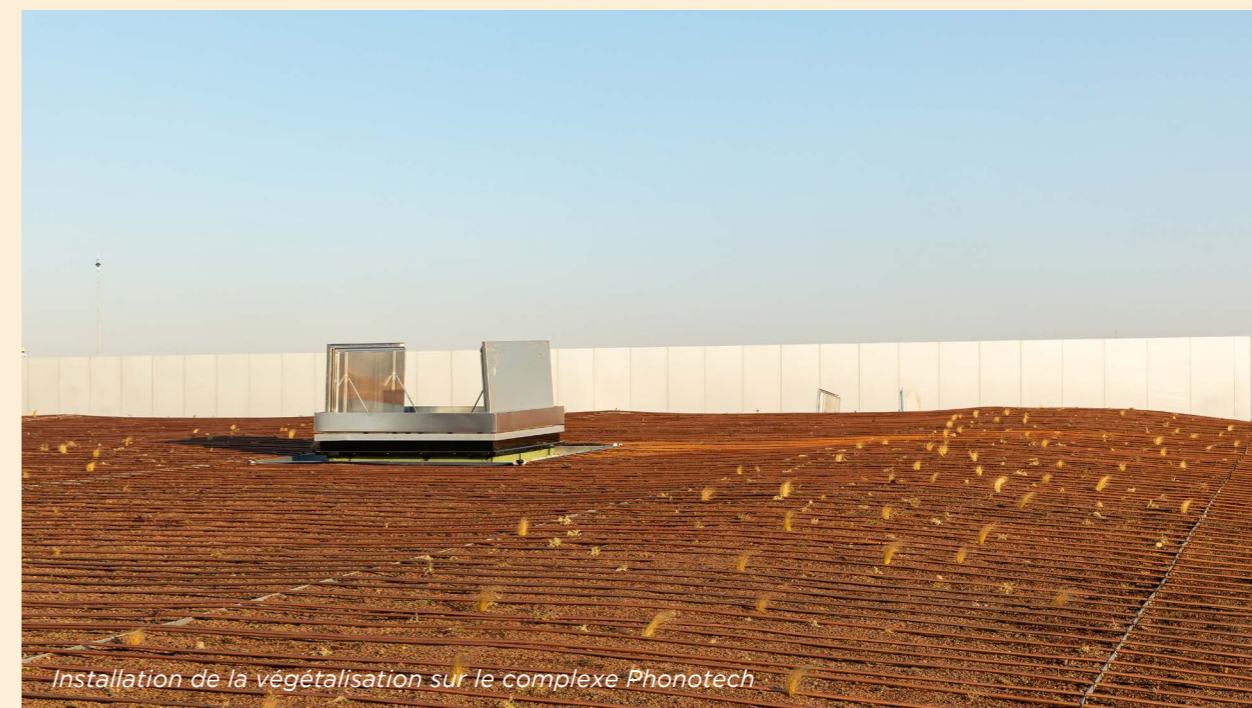
Le mobilier peut lui aussi être intégré à cette stratégie environnementale. Lors des travaux de rénovation de la piscine Georges Vallerey, l'ancienne charpente bois a été déposée, reconditionnée et transformée en partie en mobilier intérieur. Ce bois, déjà acclimaté aux contraintes hygrométriques propres aux halles de piscine, présente donc des performances adaptées à son nouvel usage et met en avant une réelle démarche d'économie circulaire.

f. Le biosourcé en toiture

La toiture végétalisée de la grande salle de l'Arena Porte de la Chapelle de 6 147 m² 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 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



Installation de la végétalisation sur le complexe Phonotech

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 à hauteur de 709 770 d'euros HT, 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.



Complexe Phonotech mise en œuvre sur la toiture de la salle principale de l'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 kgCO₂eq/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 kgCO₂eq/m³ s'est révélé très difficile en raison de contraintes techniques et de limitations sur le chantier. Ces ciments, plus riches en laitier de haut fourneau et moins en clinker, présentent généralement des temps de prise plus longs et un développement plus lent des résistances mécaniques initiales, ce qui peut poser des difficultés dans des ouvrages nécessitant un décoffrage rapide comme les voiles porteurs, les poteaux, ou les dalles coulées en place en cycle court. Pour ces éléments, le recours à des ciments plus réactifs (type CEM II) ou à des additifs accélérateurs peut s'avérer nécessaire. En

revanche, les CEM III/A et B sont bien adaptés aux ouvrages massifs (semelles, radier, murs de sous-sol) où le risque de montée en température est mieux maîtrisé et aux éléments non structurels (cloisons, remplissages) qui se trouvent être moins sensibles aux délais de résistance. Il faut également prendre en compte leur sensibilité aux conditions climatiques, notamment en hiver, où le froid et une forte hygrométrie peuvent rallonger encore les temps de prise - plage optimale d'utilisation constatée entre 5°C et 15°C avec une faible humidité ambiante. L'adaptation des procédures de cure est indispensable pour garantir les performances à long terme. Enfin, il a été constaté que le rendu esthétique de ces bétons était plus difficilement maîtrisable et que l'homogénéité surfacique n'était pas toujours garantie (aspect farineux, différences de teinte dans la masse etc.) Ces ajustements nécessitent une bonne anticipation en phase de conception et une coordination étroite entre les équipes de chantier, les fournisseurs de béton et la maîtrise d'œuvre afin de limiter les conflits 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 bâtimentaire, 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 66). 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 kgCO₂eq/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.

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.

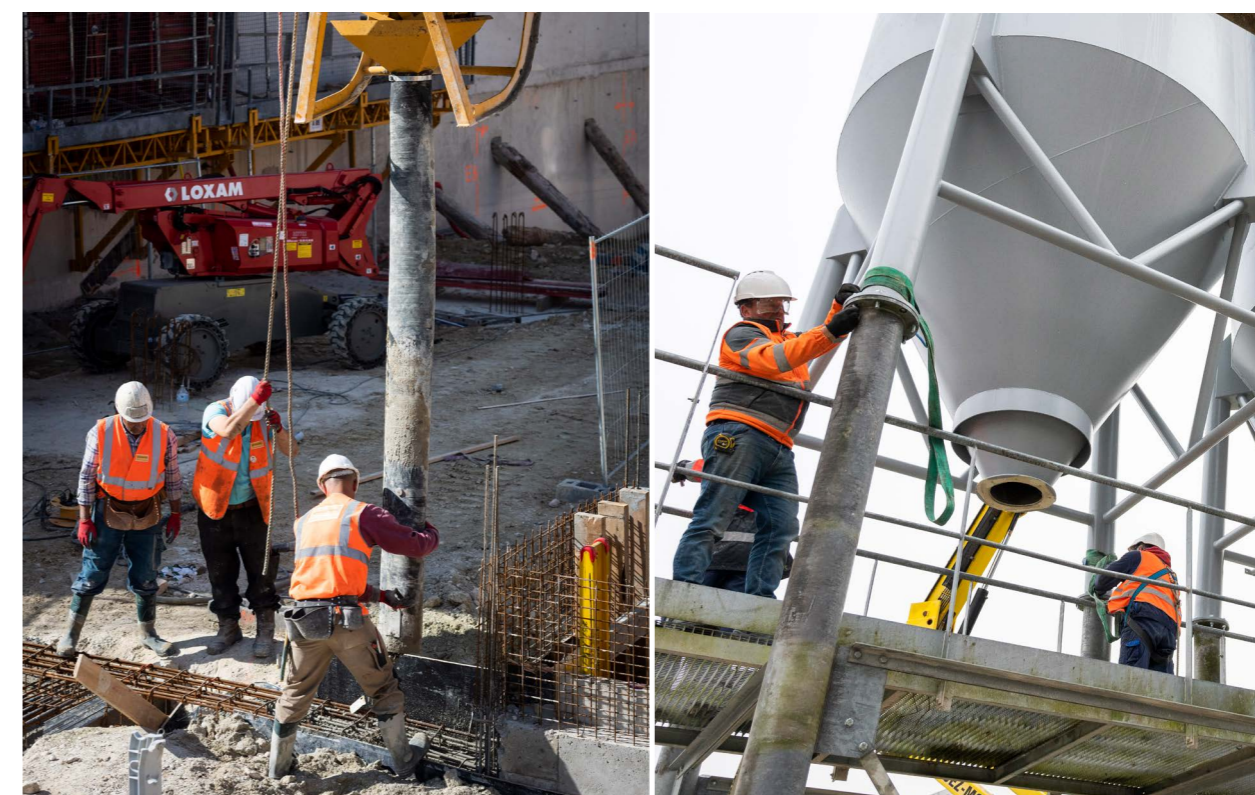
Au vu de ce constat, il apparaît que l'objectif initial aurait dû être mieux défini. Il aurait été plus pertinent de prescrire cet objectif sur les bétons de superstructure plutôt que sur ceux d'infrastructure étant donné que les bétons de fondations sont soumis à de plus fortes contraintes techniques. 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 kgCO₂eq/m³ 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.

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



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.



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 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 nécessaire 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. Définition des ambitions sur les niveaux de performance énergétique et les 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 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.

Les piscines du programme olympique

Les piscines font partie des locaux devant garantir des conditions particulières d'hygrométrie. Elles sont à ce titre partiellement exclues du champ d'application de la réglementation thermique, autant en cas de construction que de rénovation, puisque seuls les locaux administratifs devront la satisfaire. Aucun objectif réglementaire ne permet d'encadrer ses consommations énergétiques.

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.

La SOLIDEO a fait le choix de baser ses objectifs de consommations énergétiques sur ces constats, en définissant les niveaux suivants de consommation énergétique pour les piscines construites du programme olympique : 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 adaptées en concertation avec les différents maîtres d'ouvrage afin de tenir compte des spécificités des programmes de chaque opération.

Sur la base des analyses faites au moment de la réception des ouvrages, toutes les piscines construites respectent leurs engagements énergétiques, à l'exception de la piscine de Marville. Celle-ci dispose en effet d'un bassin nordique qui entraîne des besoins spécifiques et plus élevés que ceux d'un bassin intérieur. Ce bassin représente à lui seul près de 50 % des déperditions énergétiques du projet et s'écarte de plus de 30 % de l'objectif fixé. En comparaison, son bassin classique reste conforme au

programme initial avec un gain de 20% sur l'objectif. Un bassin nordique présente néanmoins plusieurs avantages, notamment sur la question sanitaire, et permet de répondre à des besoins différents de ceux d'un bassin intérieur. Toutefois, pour limiter son impact sur la consommation d'eau et d'énergie, plusieurs mesures doivent être envisagées :

- Optimiser l'orientation du bassin nordique pour réduire les pertes liées à la convection forcée causée par les vents dominants ;
- Renforcer l'isolation des parois verticales des bassins extérieurs. Ceux du centre aquatique d'Aulnay-sous-Bois présente une résistance thermique de 2 m².K/W (soit 8 cm de polystyrène expansé) permettant une économie annuelle d'environ 170 MWh.
- Mener une réflexion sur la mise en place systématique d'une couverture thermique lorsque le bassin est inoccupé. Pour la piscine de Marville, ce dispositif a permis de réduire la consommation globale de plus de 1%. La bâche thermique peut également être utilisée en intérieur. En effet, il est estimé que près de 80% des déperditions thermiques d'un bassin proviennent de l'évaporation, de la convection et du rayonnement. L'installation d'une couverture thermique peut permettre une adaptation à la baisse du régime des systèmes de ventilation, de déshumidification et de chauffage de l'air dans les temps d'inoccupation des bassins. Une vigilance particulière est cependant nécessaire concernant l'entretien de cette couverture car un manque d'aération peut favoriser le développement microbien et l'augmentation des concentrations en chloramines affectant la qualité de l'air et de l'eau (voir page 152).

Sur un équipement de piscine, les besoins en renouvellement de l'air pour assurer la maîtrise de l'hygrométrie des locaux et la qualité de l'air en font le premier poste de consommation en énergie. Une conception optimisée des systèmes de ventilation et de filtration est donc indispensable à la maîtrise du bilan carbone en exploitation de l'ouvrage.

Dans les halles de bassin, une CTA double flux avec échangeur de chaleur peut récupérer jusqu'à 80% de l'énergie contenue dans l'air extrait. Un système de by-pass est recommandé en été pour s'affranchir de la surchauffe de l'air neuf en été, contribuant à augmenter une température intérieure souvent déjà élevée et donc augmentant charge de refroidissement du bâtiment.

L'adaptation des débits de ventilation en fonction des besoins réels permet également des économies d'énergie, avec une réduction pouvant aller jusqu'à 2 % des consommations dans les zones administratives. La régulation des débits, notamment via une sonde CO₂ ou en fonction de l'occupation, peut réduire jusqu'à 60 % les consommations de ventilation par rapport à un système sans régulation.

Des économies supplémentaires peuvent être réalisées en installant des variateurs de vitesse sur les pompes de filtration, permettant un ajustement précis des débits en fonction des besoins de filtration ou de contre-lavage, optimisant ainsi l'efficacité énergétique tout en maintenant une qualité de filtration optimale.

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 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 du fait du 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-sur-Seine, qui a aussi activé ces leviers dans une moindre mesure, atteint un bon résultat de -39% par rapport au Bbio max.

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 132).

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 ≤ 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.

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-sur-Seine	E3 atteint, Cep - 60%
Ecoles du Bourget	Bâtiment A : E3 atteint, Cep - 68% Bâtiment B : E3 atteint, Cep - 69%

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 :

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



CTA des vestiaires de football du Gymnase du Bourget



Un projet innovant de gestion énergétique d'un immeuble tertiaire du secteur Belvédères

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, autoconsommation 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.

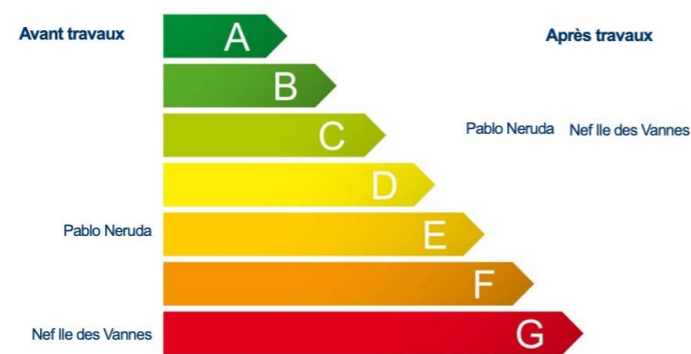
Ces travaux pouvaient concerner :

- 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 et la rénovation du gymnase Pablo Neruda. L'étiquette de diagnostic de performance énergétique présen-

tée ci-dessous illustre l'amélioration apportée par les travaux de rénovation : La Nef de l'Île des Vannes passe de la lettre G à C et le gymnase Pablo Neruda de la lettre 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. Il est également recommandé de tendre vers une réduction de moitié des consommations énergétiques totales en comparaison avec la référence fixée par le décret tertiaire (DEET).

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).

	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/m ² bassin.an	5 081	3 209	2 986	4 201
Consommation énergétiques totales après projet En kWhEF/m ² bassin.an	4 062	2 806	3 740	3 481
Gain apporté par la rénovation	- 20 %	- 13 %	25 %	- 17 %

Résultats des rénovations énergétiques de piscines

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).

a. 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 135).

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-sur-Seine, 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-sur-Seine, 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.

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

Caractéristiques environnementales du réseau du Village

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 économisés. 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

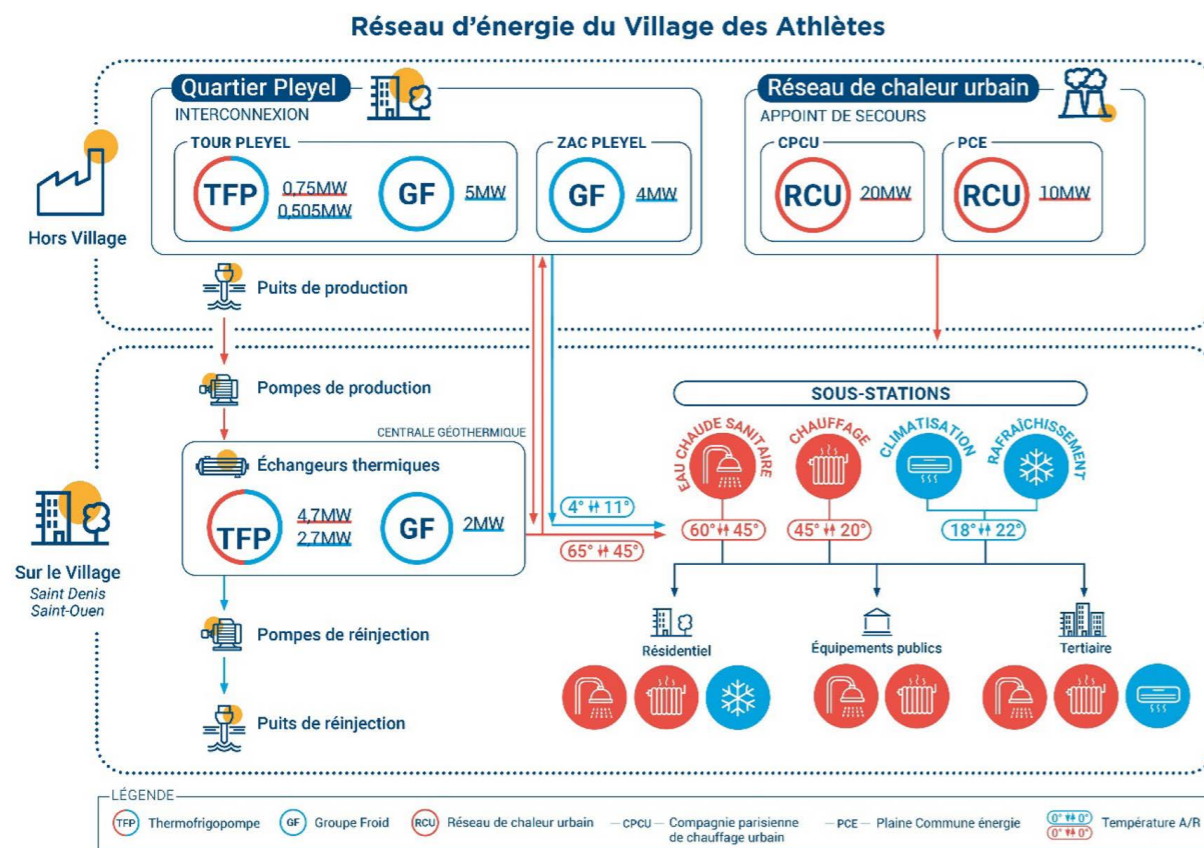
Partout où des réseaux de chaleur existaient déjà, les ouvrages olympiques y sont raccordés. Les réseaux présentent des avantages certains : un coût de l'énergie stable, une énergie produite localement et bien moins émissive en termes de carbone.

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.

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

Ouvrages raccordés à des réseaux de chaleur existants

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.



	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

Gains carbone associés au changement de source énergétique

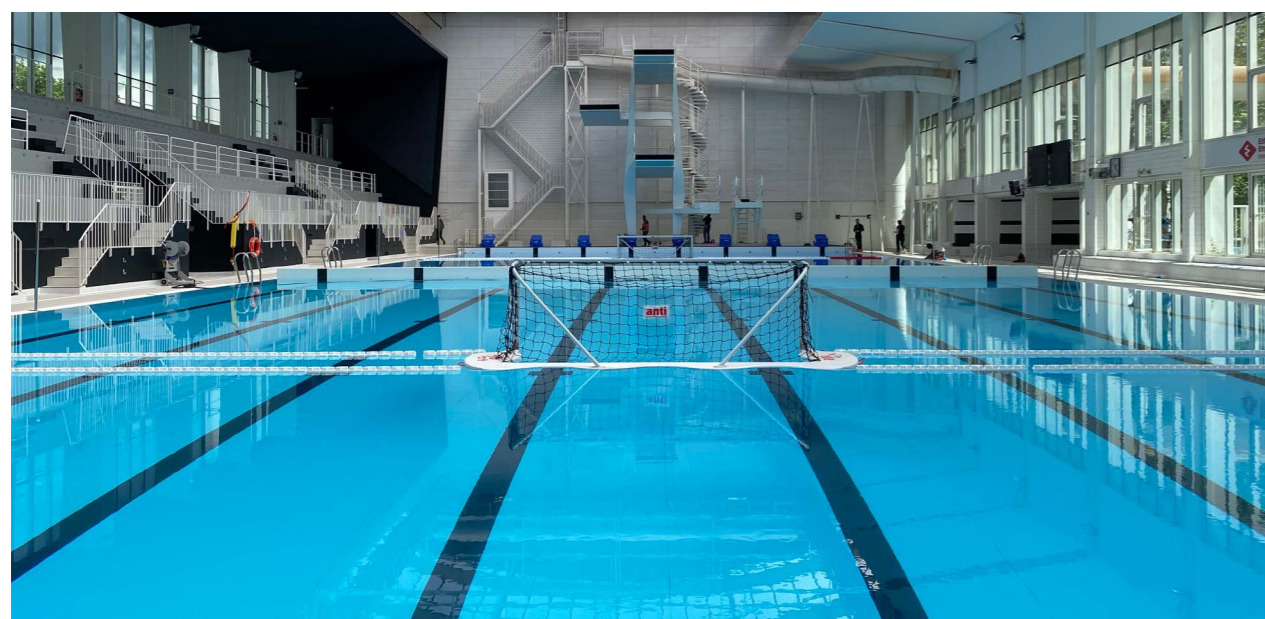
b. La récupération de chaleur

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.

Piscines	Systèmes de récupération
Piscine de Marville	<ul style="list-style-type: none"> Récupération de chaleur sur les eaux usées des douches grâce à un dispositif Gaïa Green : l'économie attendue au niveau des douches du rdc est d'environ 20% des besoins totaux Récupération des calories dans la bâche de récupération pour préchauffer l'eau froide sanitaire alimentant les apports des bassins intérieurs Vidange complète des petits bassins dans des bacs tampons calorifugés, permettant de diminuer les pertes de chaleur hors occupation
Piscine d'Aubervilliers	<ul style="list-style-type: none"> Récupération de froid 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	<ul style="list-style-type: none"> Récupération passive des eaux de déconcentration grâce à un système ONSEN Récupération sur eaux grises ECS, la récupération sur eaux de déconcentration Récupération sur déshumidification thermodynamique

Dispositifs de récupération de chaleur sur les piscines



Halle bassin de la piscine Maurice Thorez

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 :

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.

Dispositifs de récupération de chaleur du CAO

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 généralisée 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 Délégataire 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.

c. 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'abattement 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'Île-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.

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.



Pose des panneaux photovoltaïques sur la toiture du Court Suzanne Lenglen

d. 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 Île-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 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-sur-Seine 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.



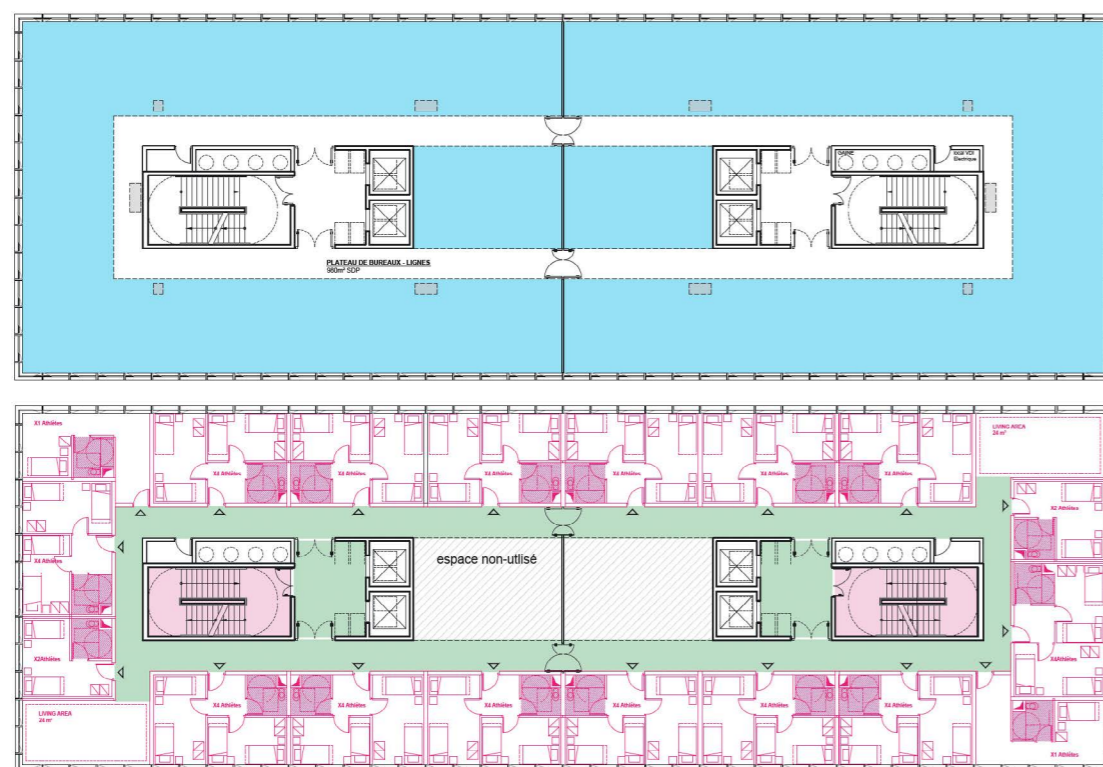
Déplacement du tablier de l'ancien pont

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 pré-identifier 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 de 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 sur l'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 resoliciter 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 VOP. Deux correspondent à des opérations de bureaux sur près de 40 000 m² SDP.

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. 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 poteaux-poutres 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.

Bien que l'aménagement intérieur des appartements et des plateaux de bureaux soit flexible, sans murs porteurs, la réversibilité n'est pas totale. La hauteur sous plafond est en effet sensible dans les constructions bois. Le pas d'étage est augmenté en raison de planchers plus épais, de l'ordre de 45 à 50 cm pour le bois contre 30 cm pour des dalles en béton. La hauteur sous plafond est de 2,50 mètres pour les bâtiments résidentiels, permettant ainsi à des professions libérales de s'y installer également. Les bâtiments tertiaires bénéficient de hauteurs plus généreuses, en moyenne de 3,60 mètres, avec une hauteur libre de 2,70 mètres, favorisant leur adaptabilité à tout autre type de programmation.

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 toutes les exigences en matière d'acoustique, de thermique, de réglementation incendie et y compris 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.

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 été publiée en mars 2024 en reprenant en détail les options prises sur un échantillon de six bâtiments du Village des athlètes. Cette étude est disponible ici : [La réversibilité à l'épreuve du village olympique et paralympique, 6 cas d'étude.](#)

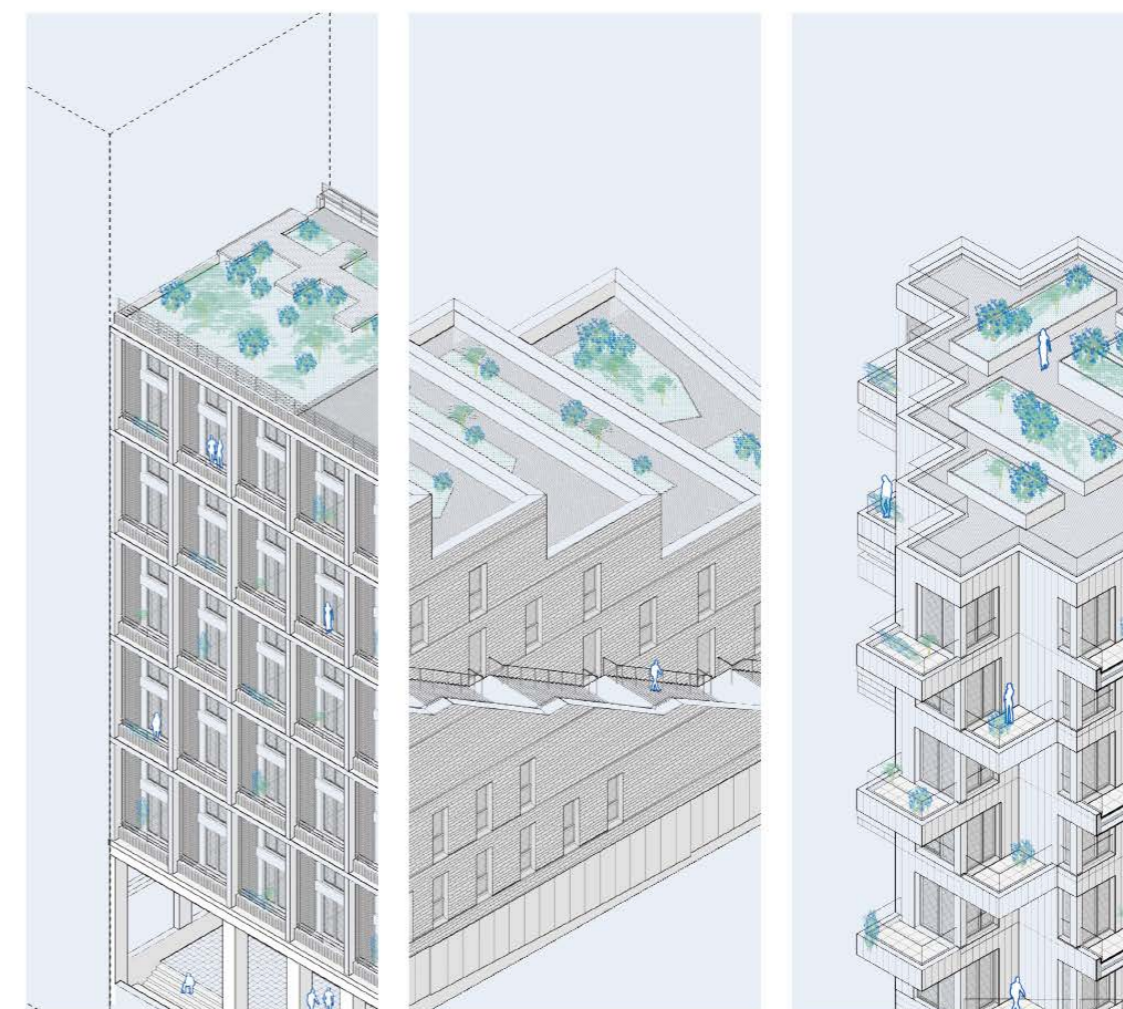
Cette étude révèle notamment que certaines exigences de la SOLIDEO pourraient être incompatibles avec une réversibilité complète des bâtiments. En effet, l'utilisation d'une structure bois rend complexe les reconfigurations de bâtiment à cause des contraintes acoustiques. Des poutres ont parfois été 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 m²SDP de bureaux en valeur 2024).

LA RÉVERSIBILITÉ À L'ÉPREUVE DU VILLAGE OLYMPIQUE ET PARALYMPIQUE

Six cas d'étude

Mars 2024



MAIRIE DE PARIS
SOCIÉTÉ DE LIVRAISON DES
OUVRAGES
OLYMPIQUES

MG | A | U
MICHEL GUTHMANN & ASSOCIÉS
ARCHITECTURE URBANISME

UNE
FABRIQUE
DE LA VILLE

DEGRÉS DE RÉVERSIBILITÉ DES CONSTRUCTIONS

Échelle du logement

PRINCIPES CONSTRUCTIFS
FAVORISER UNE ÉVOLUTIVITÉ DES AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS

COMPLEXE DE DALLE
INTÉGRATION DOUCHE ZÉRO RESSAUT

RÉSEAUX ET TECHNIQUES
ÉVITER LES OBSTACLES

CHEMINEMENT ÉLECTRIQUE HORS CLOISON
RECONFIGURATION DU LOGEMENT

CÂBLAGE SUPPLÉMENTAIRE
PIÈCE SUPPLÉMENTAIRE

RÉSEAUX CHAUFFAGES
ÉVITER CHEMINEMENT DANS CHAPE

ESPACES POLYVALENTS ET MODULABLES
POLYVALENCE DES USAGES

LOGEMENTS SPACIEUX
CONFIGURATION MULTIPLE

PIÈCE HUMIDE EN PREMIER JOUR
TRANSFORMATION DES CUISINES EN CHAMBRES

FAÇADE
ADAPTER AUX USAGES MULTIPLES

STANDARDISATION DES OUVRANTS - FAÇADE GÉNÉRIQUE
INDÉTERMINATION DES ESPACES

VENTILATION
À PRÉVOIR DANS CHAQUE PIÈCE

Échelle de l'étage/plateau

PRINCIPES CONSTRUCTIFS
RENDRE POSSIBLE UNE NOUVELLE CONFIGURATION

DÉVELOPPER UN PLAN LIBRE
POTEAUX-POUTRES
TRAITEMENT DES SÉPARATIFS EN CLOISON LÉGÈRE

RETOMBÉES DE POUTRES
RÉSERVATION À ANTICIPER

RÉSEAUX ET TECHNIQUES
ENVISAGER UN USAGE DIFFÉRENT

GAINES ET IMPLANTATIONS
RYTHME GÉNÉRIQUE
RÉPARTITION SUR L'ÉTAGE ET LE PLATEAU

DIMENSIONNEMENT
SURDIMENSIONNER LES RÉSERVATIONS

EXTERNALISATION DES COMPTEURS HORS LOGEMENTS
ÉVOLUTION DES GRANULOMÉTRIES

RÉSEAUX CHAUFFAGES
ÉVITER CHEMINEMENT DANS COUCHE NON MODIFIABLE

Échelle du bâtiment

STRUCTURE
FAVORISER UNE FLEXIBILITÉ DES USAGES

DIMENSIONNEMENT STRUCTUREL
Hybride entre les exigences tertiaires et résidentielles

TRAME GÉNÉRIQUE
APPLICABLE À UNE MULTITUDE DE PROGRAMME

COMPLEXE DE DALLE
FAVORISER DES DALLES PROPICES À MODIFICATION ET CAROTTAGE FUTURS
PRÉVOIR DES RÉSERVATIONS FUSIBLES

TRAITEMENT DES FAÇADES
FAVORISER UNE FLEXIBILITÉ DES USAGES

RÈGLE DU C+D
Intégrer systématiquement

FAÇADE LÉGÈRE
FOB / MOB

NORMES ET RÉGLEMENTATIONS
CHOISIR LA PLUS CONTRAIGNANTE

ACOUSTIQUE / THERMIQUE
ACCESSIBILITÉ

PARKING
FAVORISER LA RÉVERSIBILITÉ

COURS ANGLAISE / PATIO
Amener un éclairage naturel au sous-sol

CIRCULATIONS
FAVORISER UNE FLEXIBILITÉ DES USAGES

RÉGLEMENTATION INCENDIE
Distance de sécurité propice à double programme

IMPLANTATION DES ASCENSEURS
ÉVITER LA CENTRALISATION OU PRÉVOIR DES RÉSERVATIONS POUR L'IMPLANTATION DIFFÉRENCIÉE DES ASCENSEURS

Échelle urbaine

DISPOSITIF URBAIN
RENDANT COMPATIBLE PLUSIEURS PROGRAMMES

ÉCHELLE ET MORPHOLOGIE

RATIONALITÉ
VERTICALITÉ DES RÉSEAUX ET SUPERPOSITION DES ESPACES EXTÉRIEUR

HAUTEUR D'ÉTAGE ET GLOBALE
ÉPAISSEUR ET ÉCLAIRAGE NATUREL

ESPACE EXTÉRIEUR
PROPICE À L'INDIVIDUALISATION ET FLEXIBLE

GESTIONS ET ACCÈS
ANTICIPATION ET RÉSERVATION

PARKING MODULAIRE ET DIVISIBLE
Unité indépendante

ACCÈS SUPPLÉMENTAIRES
piéton et voiture => dalle fusible / traitement des façades / ...

La réversibilité des bâtiments requiert une prise en compte de nombreux éléments d'échelles différentes pour garantir une flexibilité maximale et une adaptation à diverses utilisations.

Cela implique non seulement de concevoir des espaces intérieurs modulables, mais également d'adopter les solutions techniques, structurelles et architecturales pour faciliter et anticiper les changements futurs.

Synthèse de l'étude de réversibilité du Village des athlètes

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 été contractualisées sous la forme de contrats de location ;

- 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 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 pour cela été largement diffusé aux acteurs de la construction : maîtrise d'ouvrage, architectes, bureaux d'étude. Certains projets ont ainsi pu réserver des gisements connus et qualifiés de matériaux du village ;
- la reprise par des artisans ou particuliers via des plateformes web ou physiques de réemploi.



LOT PLOMBERIE

	<p>WC PMR Modèle/Marque : Porcher , Matura Dimensions : 700mm x 365mm x 400 mm Dates de disponibilité : fin 2024 - début 2025</p> <p>QUANTITE : 32 u</p>
	<p>WC PMR Modèle/Marque : DURAVIT , Stark3 Dimensions : 700mm x 360mm x 400mm Dates de disponibilité : fin 2024 - début 2025</p> <p>QUANTITE : 17 u</p>
	<p>BLOCS SALLE DE BAIN Modèle/Marque : Baudet CESA Dimensions : 2145 x 1290 x 2220 Dates de disponibilité : fin 2024 - début 2025</p> <p>QUANTITE : 255 u</p>

Catalogue de matériaux de réemploi



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

c. Des résultats encourageants

Les visites de chantier en phase héritage ont permis de faire le point avec les entreprises sur les tableaux de suivi des objectifs, la collecte des documents justificatifs des exutoires des produits de réemploi, les zones et les modalités de stockage.

La traçabilité des produits constitue l'un des enjeux majeurs du réemploi : les modes de preuves attendus doivent être définis au début du chantier (fiches de traçabilité, contrat de cession etc.) en concertation avec les entreprises afin d'éviter des échanges fastidieux à la réception des travaux. Pour garantir au mieux cette traçabilité, des tableaux de suivi recensant les quantités totales, les quantités réemployées, les exutoires et les références des justificatifs ont été instaurés.

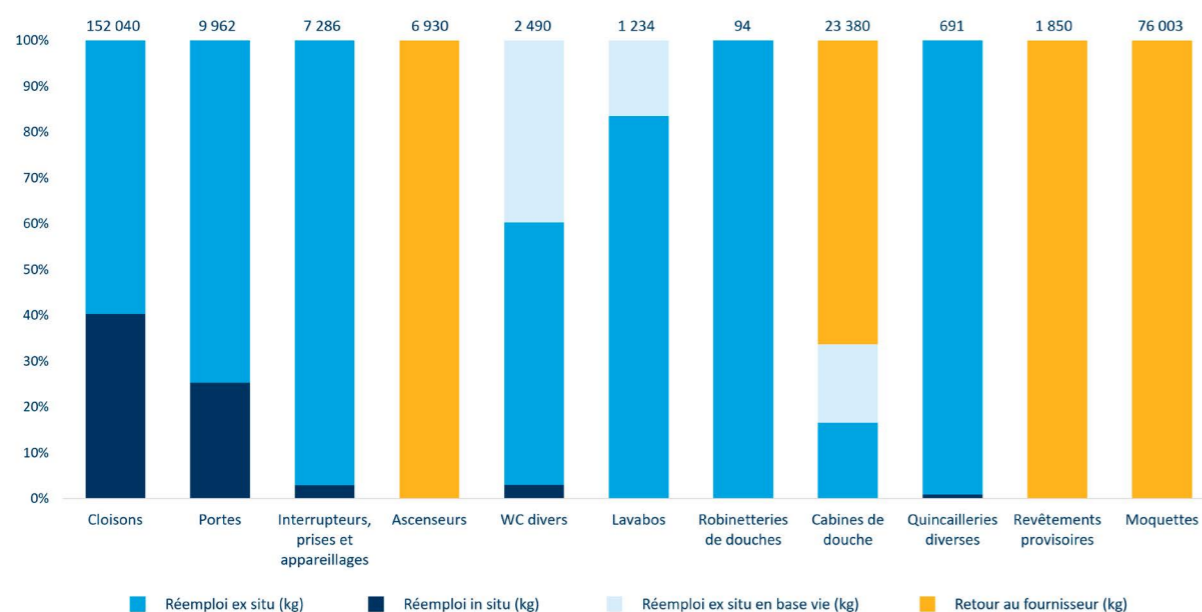
Près de 282 tonnes de matériaux ont été réemployés par différentes voies. 23% d'entre eux ont été réemployés in situ, à l'instar des cloisons qui représente 96% de ce réemploi sur le chantier avec diverses applications (décloisonnement/recloisonnement lors du réaménagement de certains appartements, remplacement en tête de cloisons etc.). Les chutes ont également été calepinées afin d'être réutilisées dans les zones de stockage des parkings. Avec une représentativité de 77%, le réemploi ex situ sur d'autres chantiers a été privilégié notamment pour une partie des cloisons, des portes et des interrupteurs. Les autres produits concernés sont les équipements sanitaires, principalement

récupérés par Bâticycle, acteur de l'économie circulaire situé à Gennevilliers. Enfin, les ascenseurs et les moquettes ont intégralement été repris par les fournisseurs conformément à la contractualisation prévue et anticipée.

Malgré la structuration progressive des filières de réemploi, plusieurs entreprises ont peiné à trouver des exutoires pour certains produits. C'est notamment le cas des portes de distribution dont les dimensions, conformément au cahier des charges de Paris 2024, se trouvent être plus larges que les standards du marché. En dernier recours, certaines entreprises ont repris des équipements sanitaires afin d'aménager leur base-vie.

Cette pratique a soulevé plusieurs interrogations, notamment sur la durée de vie des produits et sur la capacité à préserver l'intégrité des ouvrages lors des déposes. Si cette solution semble pertinente - les équipements pouvant être réemployés plusieurs fois sur des chantiers de quelques années - il reste préférable de favoriser le réemploi sur des opérations plus pérennes.

En effet, chaque manipulation (dépose, stockage, transport) peut compromettre l'état des équipements. Par ailleurs, le suivi de ces gisements devient plus complexe si la traçabilité n'est pas rigoureusement assurée à chaque changement de base-vie.



Masse et répartition des produits réemployés selon le type d'exutoire



Menuiseries extérieures déposées pour permettre l'évacuation des salles de bains provisoires à l'aide d'un lift

Par ailleurs, les entreprises ont été confrontées à plusieurs questions de logistique, de coltinage et de manutention, ce qui a été l'occasion d'expérimenter de nouvelles pratiques.

Par exemple, sur le secteur Universeine, une partie des menuiseries existantes a dû être déposée afin d'extraire les salles de bains provisoires utilisées en phase jeux et destinées à être réemployées sur un autre chantier en phase héritage.

Ainsi, après avoir découpé les évacuations et débranché les arrivées d'eau, les salles de bains provisoires ont été transportées à l'aide d'un transpalette et positionnées sur des chevrons afin d'être filmées. Elles ont ensuite été évacuées par la façade à l'aide d'un lift.



Dépose d'une menuiserie extérieure

3. Le Centre Aquatique Olympique : une piscine modulaire

La réversibilité entre la phase jeux et héritage ne concerne pas seulement le Village des athlètes. La jauge de spectateurs 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. Le nombre de gradins est diminué passant de 6 000 places à 3 000 places en configuration héritage. L'espace libéré, au sud du bâtiment permet de créer une salle annexe dédiée à d'autres usages sportifs. Ces aménagements sont réversibles, ce qui permettra à l'ouvrage d'accueillir des compétitions internationales (notamment les Championnats d'Europe en 2026).

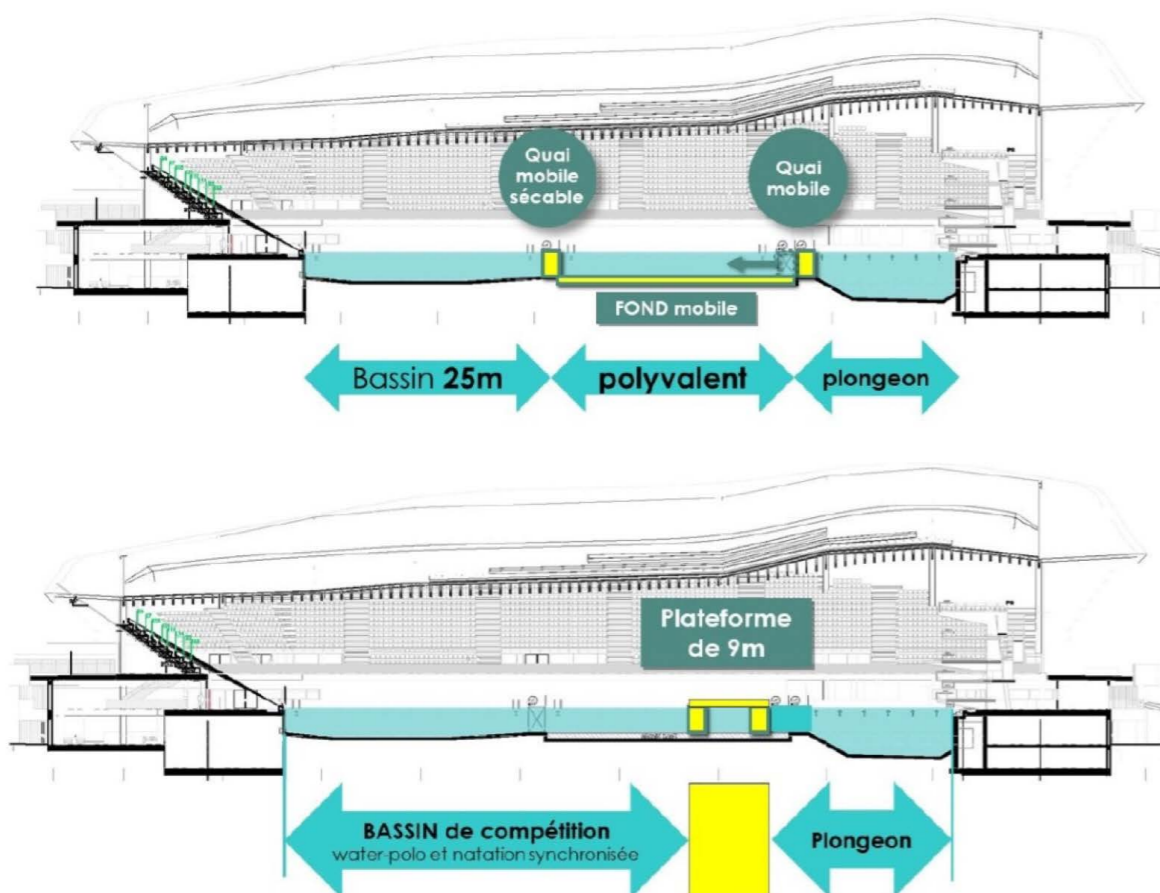
Les adaptations entre les deux phases ont été pensées dès le début de la phase conception du bâtiment de manière à réduire au maximum la dépose des éléments techniques et des matériaux mis en place. La question des flux

a été imaginée en amont pour permettre de dimensionner au mieux les accès, les locaux, les réseaux et les capacités d'accueil en fonction des usages.

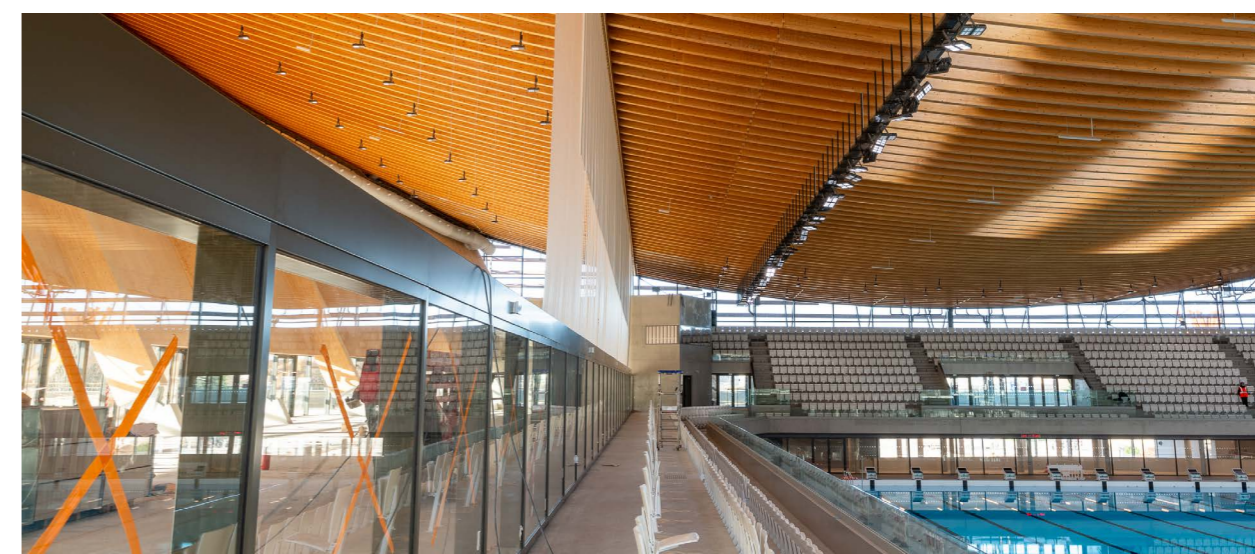
En phase jeux, des tribunes de 6 000 places ont été installées de type Arena « en fer à cheval » autour d'un bassin de 70 mètres de long. Ce bassin est doté de deux quais mobiles et d'un fond mobile permettant de multiples configurations de bassins et une polyvalence riche d'usages. Ils permettent notamment des configurations en bassin d'apprentissage, en bassin polyvalent ou bassin de compétition. En phase héritage, l'ouvrage est reconfiguré pour répondre aux besoins des collectivité c'est-à-dire à la fois la pratique du sport accessible à tous, mais également l'organisation de compétitions d'envergure internationale comme la natation, plongeon, la natation artistique et le water-polo.

Les tribunes resteront ainsi modulaires : en configuration quotidienne, la jauge est à 3 000 places. Le vaste espace du deuxième niveau laisse alors place à 9 terrains de padel. 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

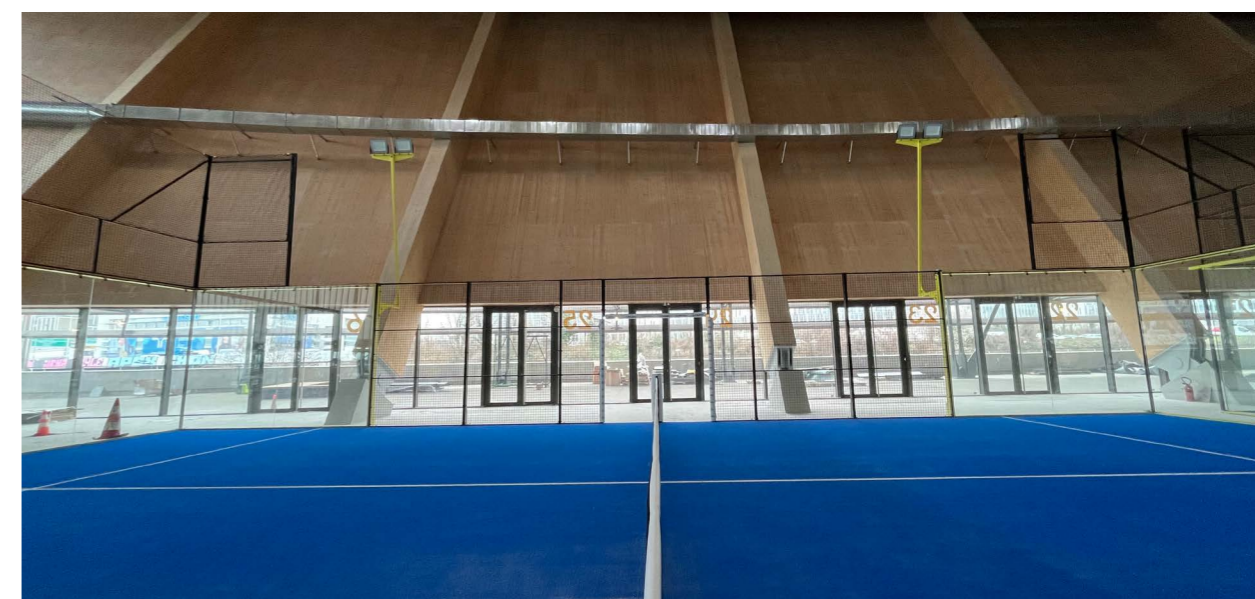
en construction légère de bandes verticales PVC transparentes, tendues depuis la toiture. Il reste toutefois possible de remettre facilement en place les tribunes temporaires lors des compétitions sportives de haut niveau et atteindre une jauge initiale.



Les configurations des bassins du CAO



Cloison séparative entre les terrains de padel intérieurs (sur la gauche) et la principale halle bassin du CAO (sur la droite)



Terrain de padel au sein du CAO



Dépose en cours de la cloison séparative

La conception modulaire et compacte du CAO permet également de donner place à une salle d'escalade de 1 000 m², une recyclerie sportive et un restaurant.

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

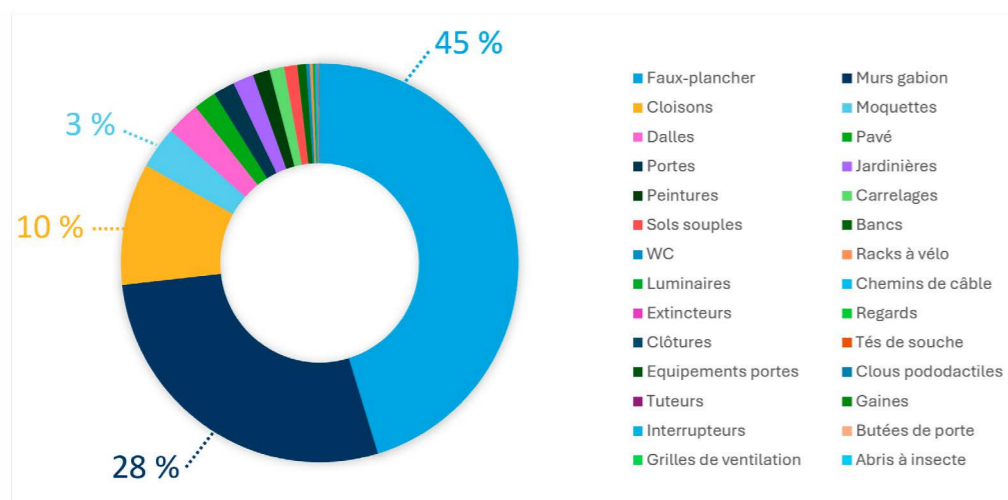
Les trois opérateurs immobiliers de la ZAC du VOP ont opté pour des stratégies d'appropriation des enjeux du réemploi différentes. Certains d'entre eux se sont fait accompagner dès la phase de conception par un AMO et ont ainsi identifié des familles de produit qu'ils ont imposés ensuite à leurs entreprises générales. D'autres promoteurs se sont dessaisis 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, les murs à gabion, les cloisons, les moquettes, et les dalles gravillonnées. Les opérateurs ont privilégié l'intégration sur les corps d'états architecturaux plutôt que sur les corps d'états techniques avec une forte proportion de produits réemployés pour le lot menuiseries intérieures (faux-plancher et cloisons) et le lot revêtements (moquette) grâce à l'existante de filières de réemploi déjà structurées.

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'inventus, 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 de seconde-vie. L'impact carbone des produits de réemploi a été considéré comme nul. 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 VOP, le recours à du faux-plancher de réemploi permet un gain de 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 œuvre comme :

- 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 auraient pu palier

cette question en se tournant vers des chantiers de déconstruction de logements afin de récupérer le gisement en vue de le reconditionner par une entreprise spécialisée telle que Bâticycle. 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 Industrie) délivre des produits garantis après reconditionnement. 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



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 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.

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 carreaux 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 plateaux 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 répliquable 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.



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.

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

Les ouvrages olympiques ont tous eu 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 113).

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, plus de 10 500 sièges 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.



Sièges en plastique recyclé du CAO



Sièges en plastique recyclé de l'Arena Porte de la Chapelle



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 de récupération 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 500 kg 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 vente 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'Île 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 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.
- a 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

Verre profilé translucide, le Profilit est un élément de bardage permettant un très bon apport de lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment ainsi qu'une bonne performance d'isolation acoustique et thermique.

L'un des exemples emblématiques de réemploi réalisés lors de la rénovation du Gymnase des Poissonniers est le détournement de l'usage du bardage verrier Profilit. Matériau caractéristique de l'architecture du bâtiment existant, son réemploi a constitué un élément structurant du projet en raison de l'importance et de la qualité du gisement identifié. Un travail minutieux de dépose a été mené afin de réemployer in situ la plus grande partie du bardage disponible.

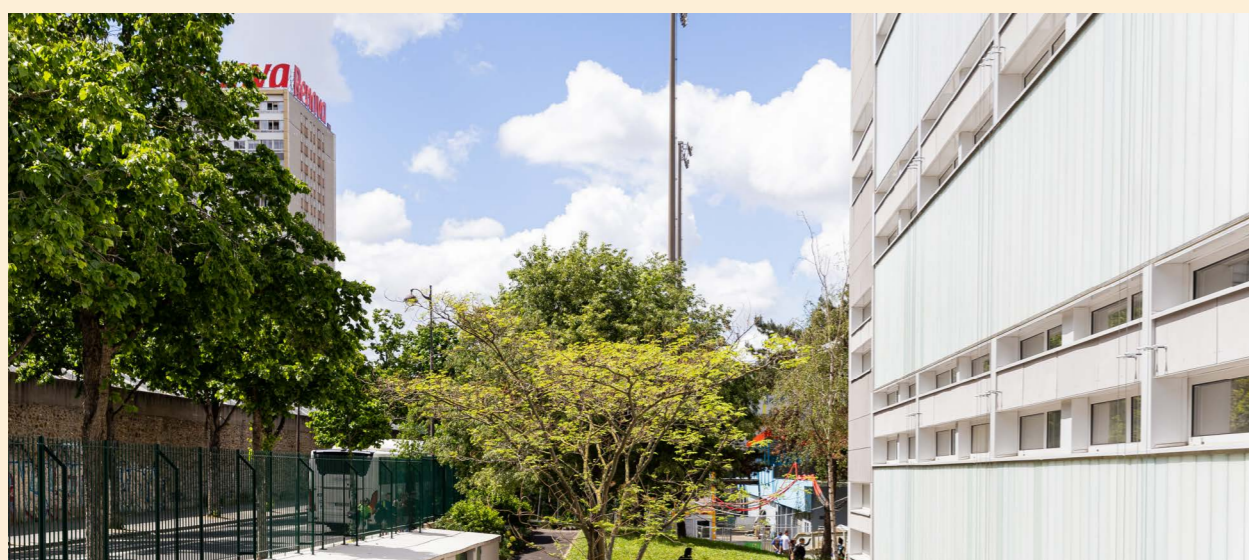
L'équipe de maîtrise d'œuvre a fait le choix de transformer l'usage initial du matériau : les murs rideaux double peau de la façade nord ont été reconvertis en bardage simple peau sur la façade sud. Le défi était de taille et risqué : les panneaux de verre ont été soigneusement démontés un à un, stockés, puis reconditionnés hors site comprenant un nettoyage des éléments avant qu'ils soient peints pour assurer l'opacité.

Au total, près de 200 m², soit 3,9 tonnes de matériau, ont ainsi été détournés pour être mis en œuvre en bardage extérieur. Une partie des parois a également été réutilisée en parement

de façade intérieur et habillage de mobilier au niveau de l'espace d'accueil du centre sportif. Le reste des parois a été donnée aux entreprises du chantier pour un réemploi ex situ. En mettant de côté les pertes liées à la fragilité du matériau lors de la dépose et de la découpe, la totalité du matériau a trouvé une seconde vie, sur site ou via un réemploi ex situ.

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.



Bardage extérieur en Profilit réemployé sur le gymnase des Poissonniers



Habillage en Profilit réemployé de la banque d'accueil du gymnase des Poissonniers

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

Pour garantir la qualité des sols et la continuité de la trame brune, la trame brune désignant la continuité écologique des sols là où la trame verte et bleue fait référence aux continuités terrestres et aquatiques, la SOLIDEO a imposé des règles strictes en matière de traçabilité et d'origine des terres. Le recours autant que possible à l'utilisation de terre végétale issue du réemploi ou, à défaut, des terres excavées du même fond géochimique (rayon de moins de 500 km) a été vivement encouragé 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 au maximum de terres issues du secteur agricole.

Cet objectif a été respecté sur les secteurs privés du Village Olympique et Paralympique. Sur les espaces publics, 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.

Par ailleurs, 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 du Village Olympique et Paralympique, le dénivelé du terrain a engendré un important volume 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 compatibles 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 (voir page 114).

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. Dans le cadre du projet d'aménagement du Terrain des Essences, les besoins en terres de remblais ont été en partie satisfaits par les déblais générés par les terrassements réalisés au droit des espaces publics de Dugny et sur les lots privés du secteur Aire des Vents.

Une convention entre le CD93 et la SOLIDEO, en sa qualité de maître d'ouvrage desdits espaces publics, a ainsi été établie. Elle précise les prérequis au transfert des terres :

- 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. Stockées séparément, les terres issues des espaces publics et des lots privés ont de nouveau, conformément aux attentes du CD93, été analysés afin de s'assurer de leur compatibilité avec les prérequis. Deux opérations distinctes de criblage ont eu lieu, entre mars et juillet 2023. Les fractions supérieures à 50 mm ont été évacuées en filière adaptée. Ainsi, au total, près de 22 000 m³ de terres foisonnées ont été apportées au Terrain des Essences portant à 80 000 m³ le volume de terres réemployées en comptant celles réutilisées in situ après leur excavation dans le cadre des travaux de dépollution (voir page 168).

80 000 M³
de terres excavées réemployées
sur le Terrain des Essences

dont

22 000 M³
(volume foisonné) provenant
des travaux de terrassement du
Village des médias.

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 (voir page 170).

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 biogaz.

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 courants 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 les centres aquatiques étant de grands consommateurs d'eau, de nombreuses solutions ont été déployées pour instaurer des cycles de réutilisation de l'eau, en vue d'atteindre les objectifs ambitieux en matière de sobriété de consommation en eau. Les objectifs programmatiques étaient les suivants :

- Consommation d'eau liée au renouvellement des bassins, au lavage et au rinçage des filtres < 60 L/baigneur/jour (hors vidange annuelle)
- Consommation d'eau totale du projet, y compris la vidange annuelle et les consommations liées à l'ECS, aux sanitaires et à l'arrosage extérieur < 100 L/baigneur/jour

L'ensemble des piscines construites dans le cadre du programme olympique respecte ces deux exigences. Ces bonnes performances sont rendues possibles grâce à l'efficacité des équipements installés, en particulier les systèmes de filtration de nouvelle génération et les dispositifs de récupération d'eau.

Des systèmes de filtration de plus en plus performants

La consommation d'eau des piscines est étroitement liée à leurs exigences sanitaires. L'un des principaux leviers techniques pour réduire cette consommation concerne les

systèmes de filtration, qui représentent entre 40 % et 50 % de la consommation totale d'eau, hors renouvellement réglementaire. La plupart des équipements existants fonctionnent encore avec des filtres à sable ou à billes de verre et, bien qu'ils assurent correctement la décontamination des eaux, ces systèmes nécessitent des contre-lavages importants, engendrant une forte consommation d'eau.

Des systèmes plus performants existent cependant : la filtration céramique, la filtration sur membrane biologique ou encore la filtration par perlite permettent de réduire significativement les besoins en eau pour fonctionner. Ces technologies peuvent générer des économies dépassant 30 % de la consommation totale d'un établissement. Pour la piscine de Marville, la récupération des eaux de rinçage des filtres a permis de diminuer sa consommation totale en eau de 23%, soit 29% de la consommation non hygiénique. La piscine Maurice Thorez a fait le choix d'une filtration par perlite, une roche volcanique particulièrement efficace pour le traitement de l'eau, pour assurer le traitement des eaux de bassin. Bien que sa vitesse de filtration soit plus faible (3 m³/h contre 20 m³/h pour le sable ou les billes de verre), ce système permet de réaliser d'importantes économies d'eau et d'énergie et améliore également la qualité de l'eau filtrée, réduisant ainsi le recours aux produits chimiques. Ce type de filtration peut permettre jusqu'à 90 % d'économie sur les volumes d'eau nécessaires au nettoyage, par rapport à filtre à sable. Si un tel système de filtration avait été déployé sur la piscine de Marville, cela aurait représenté une économie jusqu'à 28L/jour/baigneur.

Enfin, le Centre Aquatique d'Aulnay-sous-Bois a choisi une installation d'ultrafiltration pour recycler les eaux de contre-lavage. Ce dispositif, d'une capacité de 20 m³/jour, repose sur une membrane aux pores très fins

(0,01 à 0,02 µm) capable de retenir particules, bactéries, virus et autres impuretés. Deux bacs permettent de stocker les eaux avant et après traitement. L'eau ainsi ultrafiltrée est réutilisée pour les futurs cycles de contre-lavage. En plus de réduire la consommation d'eau, ce système limite également le volume d'eau à chauffer, générant une économie d'énergie, dont le retour sur investissement est estimé entre 8 et 10 ans.

Des systèmes de récupération d'eau de plus en plus présents

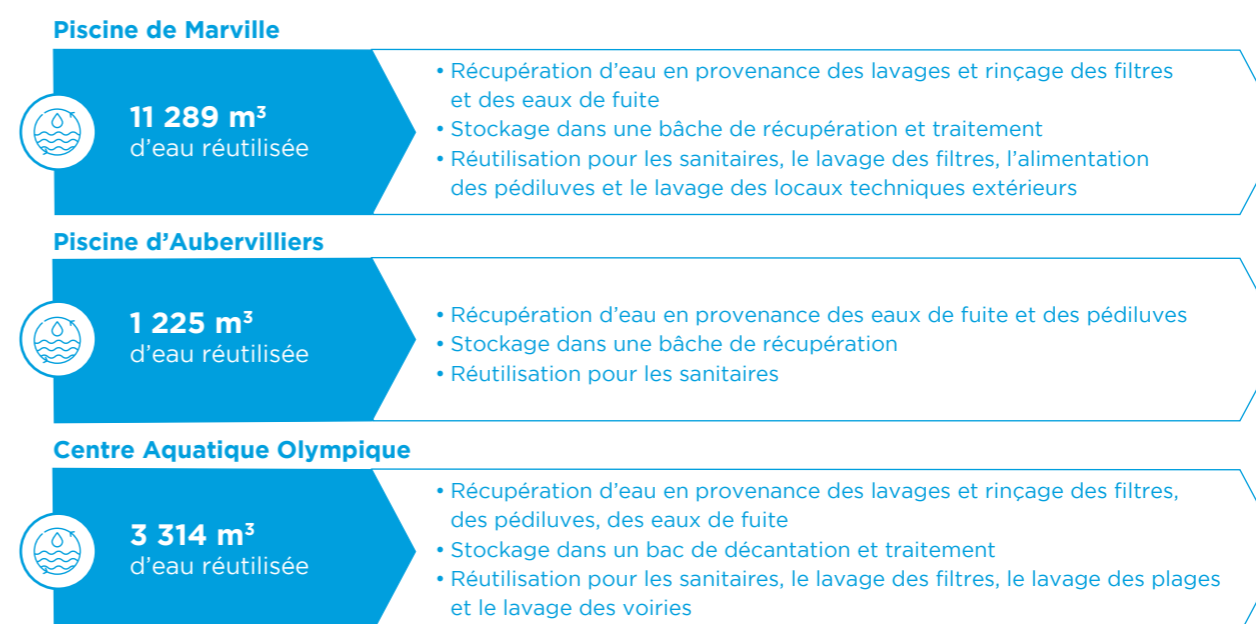
Un autre levier important pour réduire la consommation d'eau concerne la circularité des ressources. Le Centre Aquatique Olympique se distingue par son approche particulièrement innovante à ce sujet. Dès le départ, l'équipe de maîtrise d'œuvre a mené un travail d'optimisation sur la forme des fonds de bassins afin de minimiser le volume d'eau requis tout en assurant le respect du cahier des charges des différentes disciplines établi par les fédérations sportives (notamment World Aquatics - la fédération internationale de natation - et European Aquatics - l'association des fédérations nationales européennes de natation), notamment en termes de dimension et de profondeur. Cette optimisation s'est traduite par la création de plusieurs niveaux de profondeur dans le bassin olympique ainsi qu'un fond facetté pour le bassin de plongeon (voir page 98).

L'ensemble des optimisations ont permis de réduire le volume du bassin de l'ordre de 10% par rapport à des formes plus classiques. En termes d'économie d'eau, cela représente un gain d'un peu plus de 1 %, ce qui, compte tenu du volume total de plusieurs milliers de mètres cubes, est loin d'être négligeable. Toutefois, le retour d'expérience sur la mise en œuvre de ces géométries complexes reste mitigé en raison de nombreuses difficultés rencontrées en phase travaux.

Par ailleurs, alors qu'une partie des eaux des bassins et pédiluves est quotidiennement évacuée pour compenser le renouvellement en eau neuve, l'équipe de maîtrise d'œuvre a pris le parti de récupérer ces eaux après filtration et déchloration. Une fois traitées, ces eaux de renouvellement sont réutilisables jusqu'à 70% de leur volume et ce pour différents usages. Leur réutilisation pour le lavage des plages de la piscine est particulièrement innovante et présente un fort intérêt environnemental puisqu'elle représente à près de 5 % de la consommation annuelle totale d'eau de l'établissement.

Bien que la récupération des eaux de fuite soit 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. Le principal point de blocage concernait la réutilisation de ces eaux à l'intérieur, notamment pour le lavage

Procédés de récupération d'eau dans les piscines



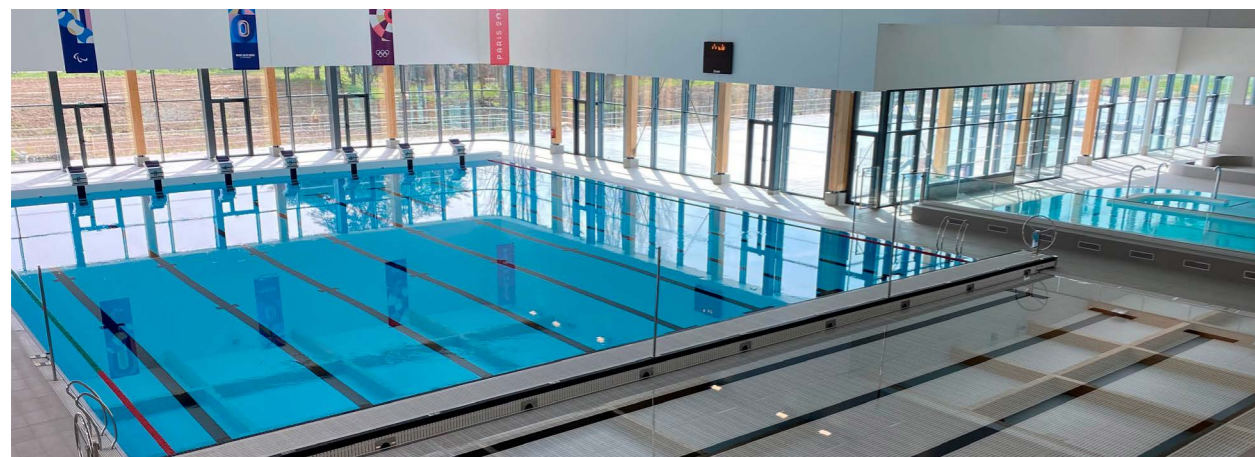
des plages, pour des questions sanitaires. Initialement refusée par l'ARS, cette utilisation a finalement été autorisée grâce à la parution, en 2023, de nouveaux textes réglementaires reconnaissant explicitement la réutilisation des eaux grises pour ce type d'usage.

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 comme dans d'autres pays notamment européens.

Enfin, une connaissance précise et une maîtrise adaptée des différents débits de renouvellement de l'eau sont indispensables pour garantir les performances de la piscine. Cela nécessite la mise en place de sous-comptages spécifiques à chaque usage

et l'adaptation de la quantité d'eau neuve injectée dans les bassins à la fréquentation réelle du site.

La piscine de Marville recycle les rejets d'eau de plusieurs postes (lavage des filtres, rinçage des filtres, pédiluves, sanitaires WC, lavages techniques), permettant ainsi une économie d'eau annuelle de 47% d'eau non rejetée au réseau d'assainissement. Comme au Centre Aquatique Olympique, le bassin principal de la piscine de Marville est équipé d'un fond et d'un quai mobiles permettant d'adapter le volume d'eau à différentes pratiques : l'abaissement du quai pour augmenter la surface du bassin lors de compétitions sportives comme le water-polo, ou relevage du fond mobile pour réduire la profondeur lors d'activités telles que les bébés nageurs.



Halle bassins de la piscine de Marville avec le quai et le fond mobiles en position relevée

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 20 m³ 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 tandis que la piscine d'Aulnay-sous-Bois permet de couvrir 60% de ses besoins en arrosage extérieur.

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-épuratives de la base mutualisée pour la préfecture de Police et la brigade des sapeurs-pompiers de Paris

Porté par la SOLIDEO en tant que maîtrise d'ouvrage propre, et soutenue par le Fonds Innovation et Écologie à hauteur de 334 000€ HT, une démarche innovante a été mise en œuvre pour le traitement et la réutilisation des eaux grises (WC et lavabos). Le dispositif repose sur une toiture végétalisée phyto-épurative de 74 m² permettant de traiter ces eaux pour des usages à la fois intérieurs (alimentation des chasses d'eau) et extérieurs (arrosage et nettoyage des espaces extérieurs).

Un second système de phyto-épuration a également été installé à l'échelle de la parcelle. Il permet de récupérer les eaux de process ayant ruisselé après le lavage des véhicules d'intervention. Celles-ci sont filtrées via une noue paysagère, avant d'être réutilisées pour les mêmes usages extérieurs.

Ces 2 systèmes entreront en fonctionnement en phase héritage, après les Jeux, avec pour objectif une réduction de l'ordre de 60 % de la consommation d'eau potable.

À l'échelle nationale, le décret n°2023-835 du 29 août 2023 a marqué une avancée importante en simplifiant les procédures d'autorisation pour la réutilisation des eaux usées traitées. Il précise également les conditions d'usage des eaux de pluie pour des usages non domestiques. Toutefois, au moment du lancement de l'opération, la réglementation française ne permettait pas encore l'usage des eaux grises traitées dans des bâtiments d'habitation.

Des démarches spécifiques ont donc été engagées auprès de l'Agence Régionale de Santé et ont finalement abouti à l'obtention d'un arrêté préfectoral dérogatoire, en date du 25 août 2022, autorisant :

- la réutilisation des eaux grises traitées pour l'alimentation des WC, le nettoyage des surfaces extérieures et l'arrosage des espaces verts ;
- la réutilisation des eaux de process traitées pour le lavage des engins, le nettoyage des surfaces extérieures et l'arrosage.

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. À terme, cette approche pourrait faire l'objet d'un référentiel technique consolidé, de type avis technique, pour favoriser son déploiement sur d'autres opérations similaires.



Toiture végétalisée de la remise des engins



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. Le bâtiment Cycle est une réalisation du groupement Icade et CDC Habitat accompagné notamment par l'entreprise Nereus. Le projet est soutenu par le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO à hauteur de 2 214 551€ HT.

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 plusieurs enjeux tels que :

- 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 NEREUS,
 - 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). L'eau recyclée sera utilisée pour les WC, l'arrosage des espaces verts, l'alimentation des lave-linges et le nettoyage des sols extérieurs, permettant ainsi 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'Île-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.

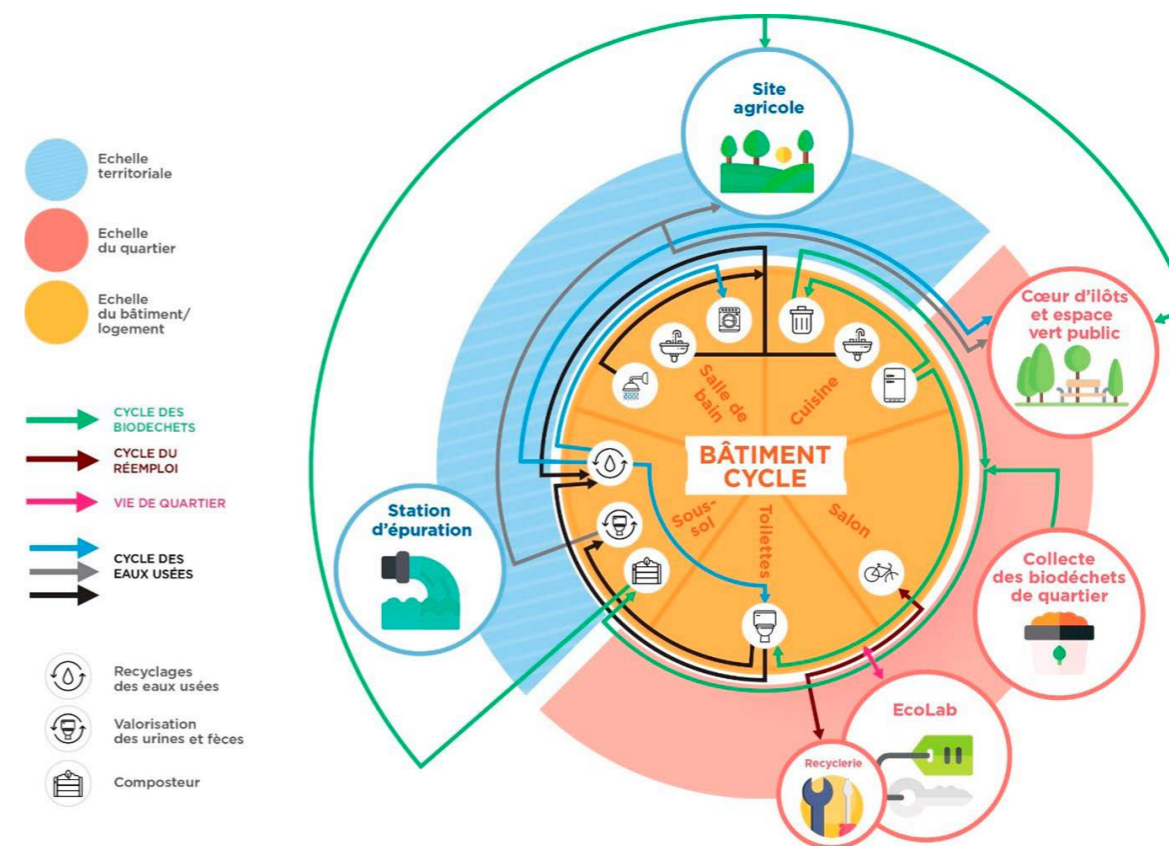


Schéma de fonctionnement du Bâtiment Cycle



Une des salles de machinerie assurant le traitement des eaux usées au sous-sol du Bâtiment Cycle

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.

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

Pour réussir la transformation écologique des villes, la SOLIDEO a souhaité embarquer les habitants et les accompagner dans cette démarche. C'est dans cette optique qu'un appel à projet a été lancé en 2021 par la SOLIDEO. Les lauréats, qui ont pour l'occasion fondé la start-up ITHAKE, ont déposé un dossier auprès du Comité d'Innovation de la SOLIDEO et ont bénéficié d'une dotation pour développer le projet, baptisé Eco Citoyen. Une deuxième dotation, demandée par l'EPT Plaine Commune en tant que territoire d'expérimentation, a permis de compléter les ressources nécessaires au développement du projet.

Soutenue par le Fonds Innovation et Écologie de la SOLIDEO, cette démarche systémique conçue par Odyssée avec l'Institut de Recherche et d'Innovation (IRI), eGreen et Atos s'incarne sur le territoire de Plaine Commune, autour du quartier du Village des athlètes, sur les communes de Saint-Denis, de Saint-Ouen-sur-Seine et de L'Île-Saint-Denis.

L'objectif de ce projet portait sur la structuration d'un réseau de mise en relation centré sur l'action des utilisateurs et ancré sur leur territoire. Le réseau d'actions favorise l'adoption de pratiques durables pour s'alimenter, se déplacer, consommer, habiter et valoriser les ressources locales.

Le point d'entrée de ce réseau est incarné par un outil numérique dédié appelé Carte Eco. Il permet de valoriser les utilisateurs et leurs actions au travers d'une monnaie locale. Les utilisateurs de l'application reçoivent des recommandations d'actions écologiques territorialisées, adaptées et progressives. Par exemple, un habitant pourra être incité financièrement à réduire son empreinte alimentaire en achetant un plat végétarien auprès d'un restaurateur local, gagnant en retour un certain nombre d'Eco sur son compte qu'il pourra ensuite dépenser dans un commerce local. Par ailleurs, des ateliers collaboratifs ont été organisés à l'image de l'opération « Ramène ton jeans » permettant

aux habitants ramenant un jeans usagé d'être crédité en retour de 5 Ecos sur leur compte. Les tissus collectés ont pu être revalorisés au travers de nouvelles créations par une association locale ayant pris part à cette initiative.

En quelques mois, 700 habitants et 140 professionnels ont adhéré à la démarche, ce qui a permis d'accélérer des initiatives déjà présentes sur le territoire telles que les cuisines contributives, visant à créer des nouvelles filières alimentaires locales et la fabrication artisanale basée sur le réemploi.

En tant qu'animateur territorial du réseau, le Comité Eco se charge d'identifier et mettre en œuvre des synergies entre acteurs. Inspirées de l'écologie industrielle territoriale, celles-ci se matérialisent par une substitution de moyens, le déchet de l'un devenant la ressource de l'autre, ou une mutualisation de moyens, par exemple des espaces ou des outils.

Pour autant, le projet n'a pas réussi à trouver un modèle économique pérenne et a dû être arrêté. Il a généré toutefois de réelles prises de conscience des acteurs ayant pris part à l'initiative et a démontré qu'il est possible de créer de nouvelles synergies, pour pousser collectivement les acteurs vers des filières plus durables. Bien que les objectifs initiaux du projet n'aient pas été atteints, plusieurs avancées technologiques peuvent être tirées de l'expérience de cette solution numérique ambitieuse. Les premiers mois du projet se sont traduits par de nombreux travaux de développement notamment afin d'assurer une souveraineté numérique, la garantie de l'accessibilité aux données, l'entraînement d'une intelligence artificielle responsable ou encore la mise en circulation d'une monnaie locale virtuelle.

Pour plus d'informations sur le projet, il est possible de consulter la page : <https://www.ouvrages-olympiques.fr/projet-eco-citoyen-retour-dexperience>



Jeu d'action territoriale 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

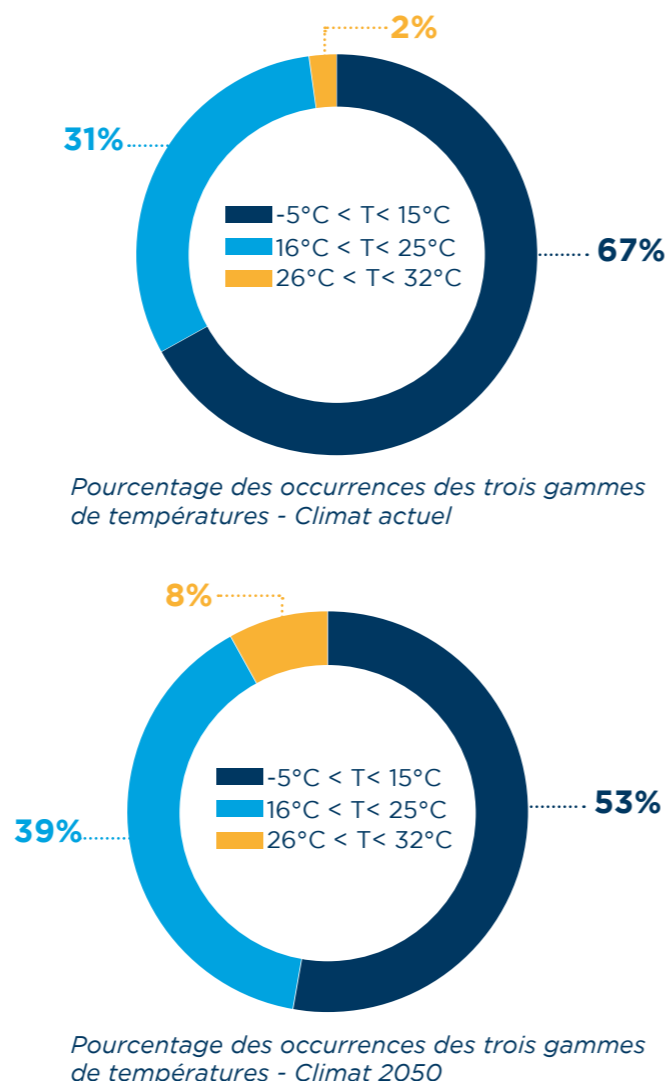
Consciente des conséquences du réchauffement climatique et des évolutions à prévoir en matière de confort urbain, la SOLIDEO a résolument inscrit les projets olympiques et paralympiques dans une logique d'adaptation. L'ensemble des maîtres d'ouvrage a été incité à considérer la résilience comme une question 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°C est de 138 heures, contre 313 heures en 2050.

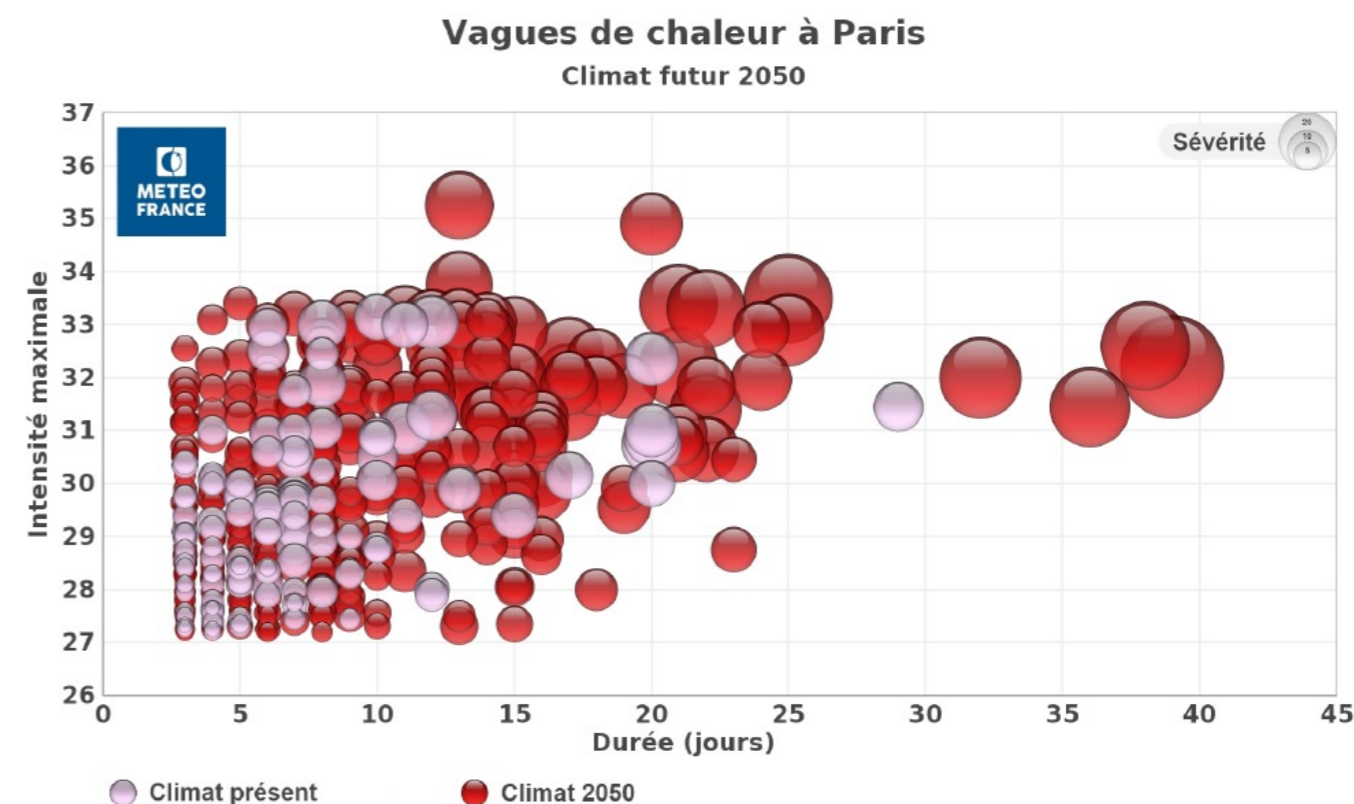


b. Des canicules plus intenses et plus fréquentes

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 Vote⁵). 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.

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.

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 :

- 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.

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

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 tem-

pérature 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.

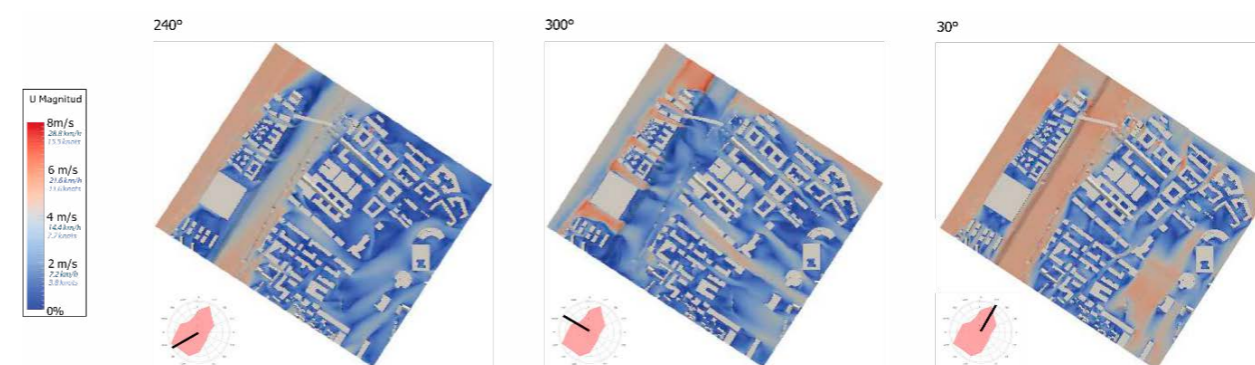
La démarche de conception bioclimatique s'illustre ainsi dans la morphologie urbaine du Village des athlètes. L'orientation des axes publics internes au quartier instaure une dualité vis-à-vis de l'ensoleillement : un côté ensoleillé agréable pour la promenade au printemps et un côté ombragé et frais 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 Ela_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 vapeurs, écrans thermiques, ...), qui peuvent subir des dégradations en cas d'écart 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 $n50 \leq 0,60$ 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 $n50 < 0,60$ 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 Jeux. 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. Les entreprises générales ont mis en place des plans d'actions correctives. Ces derniers diffèrent d'une entreprise à une autre, mais apportent tous satisfaction. De nouveaux tests sont attendus à la réception héritage des ouvrages ayant présentés des résultats insatisfaisants ainsi que pour ceux qui n'avaient pas été testés dans le précédent échantillonnage.

Par ailleurs, dans le cadre du retour d'expérience, il apparaît assez nettement que l'objectif du $n50 < 0,60$ 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 $n50$ (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 $Q4$ ($m^3/h.m$), défini comme le débit de fuite d'air sous une pression différentielle de 4 Pa rapporté à la surface de parois déperditives. Le $Q4$ 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 pre-

mier 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 compensés 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.

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.

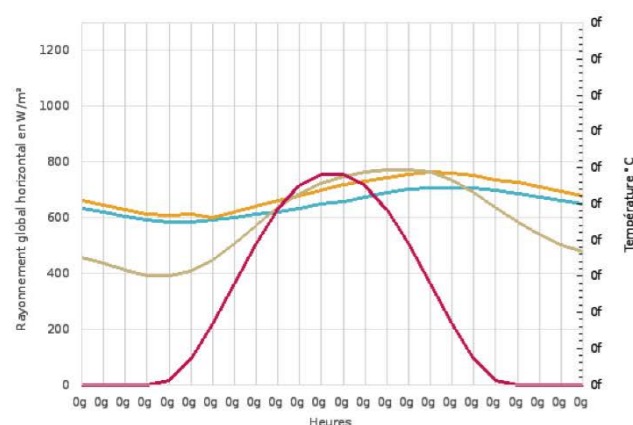
Dans un premier temps, la SOLIDEO et le SMIREC ont donc étudié l'opportunité d'un raccordement futur des programmes de logements au réseau de froid, à l'horizon 2030 ou 2040 et, dès-à-présent, l'installation de planchers réversibles (chauffants et rafraîchissants) dans les logements, en dimensionnant les réseaux en conséquence mais sans raccor-

dement et modification du dimensionnement des installations de production.

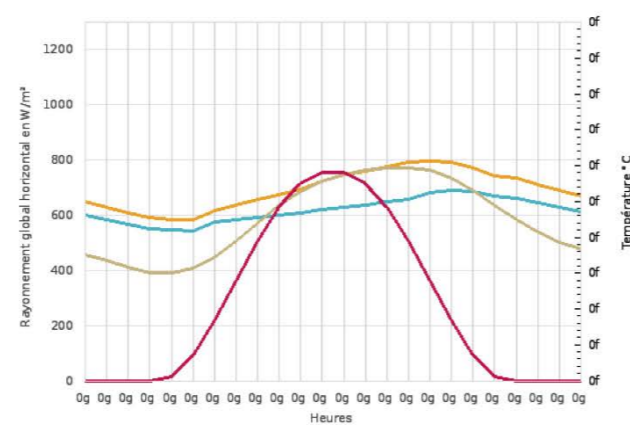
Toutefois, deux spécificités relatives à l'usage des logements en phase Jeux ont conduit à un raccordement des logements au réseau de froid dès 2024 :

- 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 ;
- a 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.

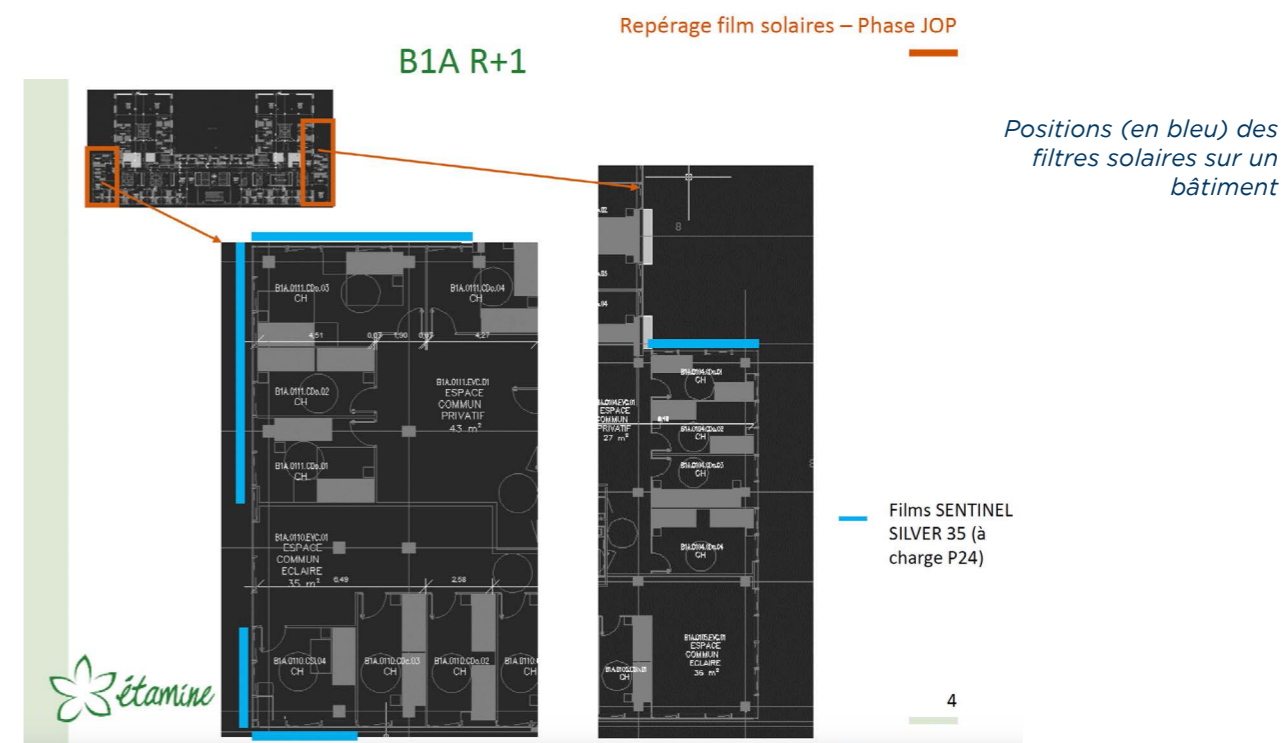


TIC d'un logement non traversant



TIC d'un logement traversant

- Rayonnement direct normé
- Température opérative Tic
- Température Ticref
- Température extérieure



Positions (en bleu) des filtres solaires sur un bâtiment

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.

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.

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,

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.

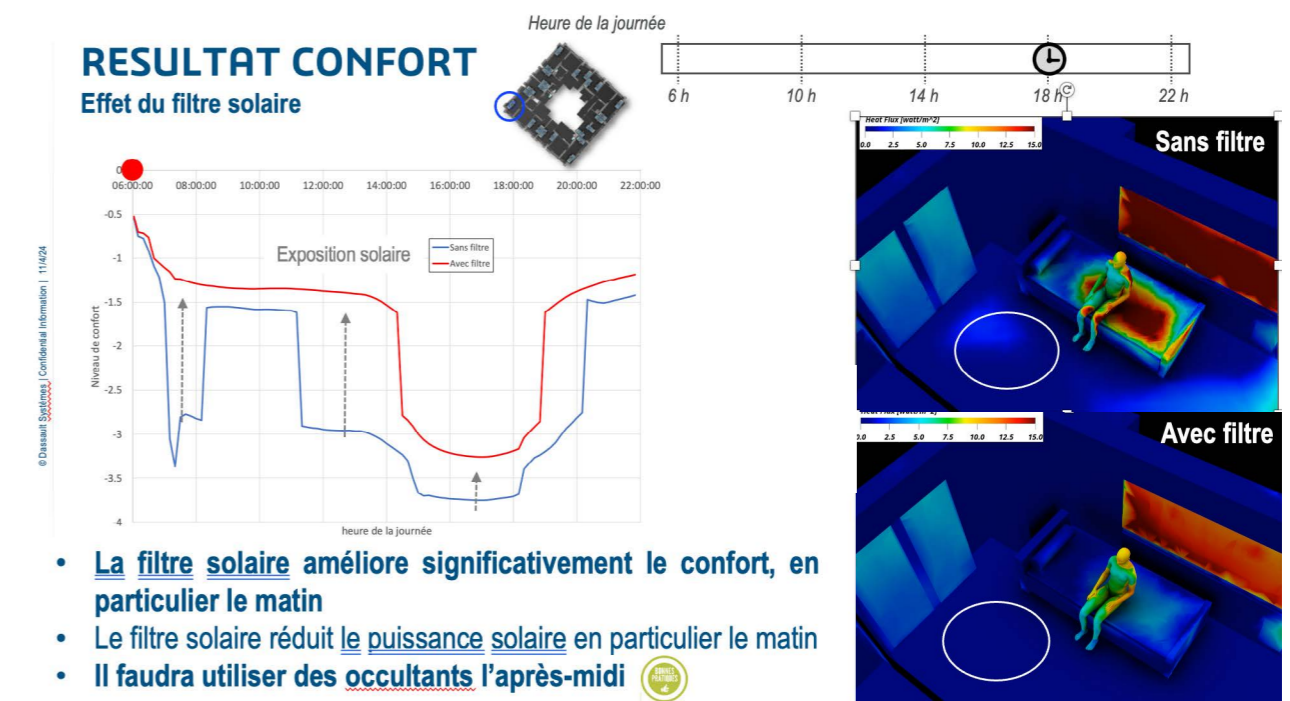
Le logiciel de simulation a été utilisé pour étudier le comportement du bâtiment, en le situant dans son contexte. Des facteurs externes comme le vent, la température de l'air, l'hygrométrie et l'ensoleillement ont été pris en compte, tout aussi bien que les effets de la conception bioclimatique du Village 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

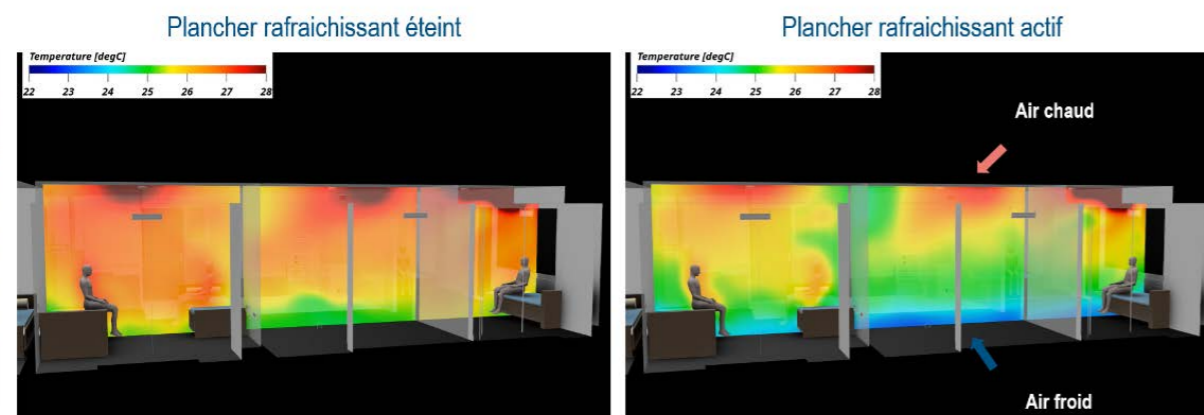
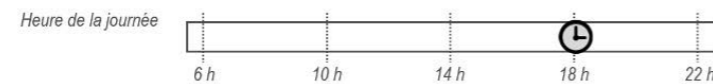
La simulation montre qu'en conditions de canicule (chaleur élevée se propageant sur plusieurs jours et nuits consécutives), à défaut d'activer le plancher rafraichissant, la chaleur s'accumule et on observe une augmentation progressive de la température intérieure, jusqu'à dépasser la différence d'au 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.

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. Ces systèmes passifs aident particulièrement à la déstratification des grandes espaces et améliorent le confort des usagers par création d'un mouvement d'air sur la peau. Dans un bâtiment correctement isolé, une vitesse de souffle d'un 1 m/s permet de diminuer la température ressentie de près de 2°C.

RESULTATS 3D Effet du plancher rafraichissant

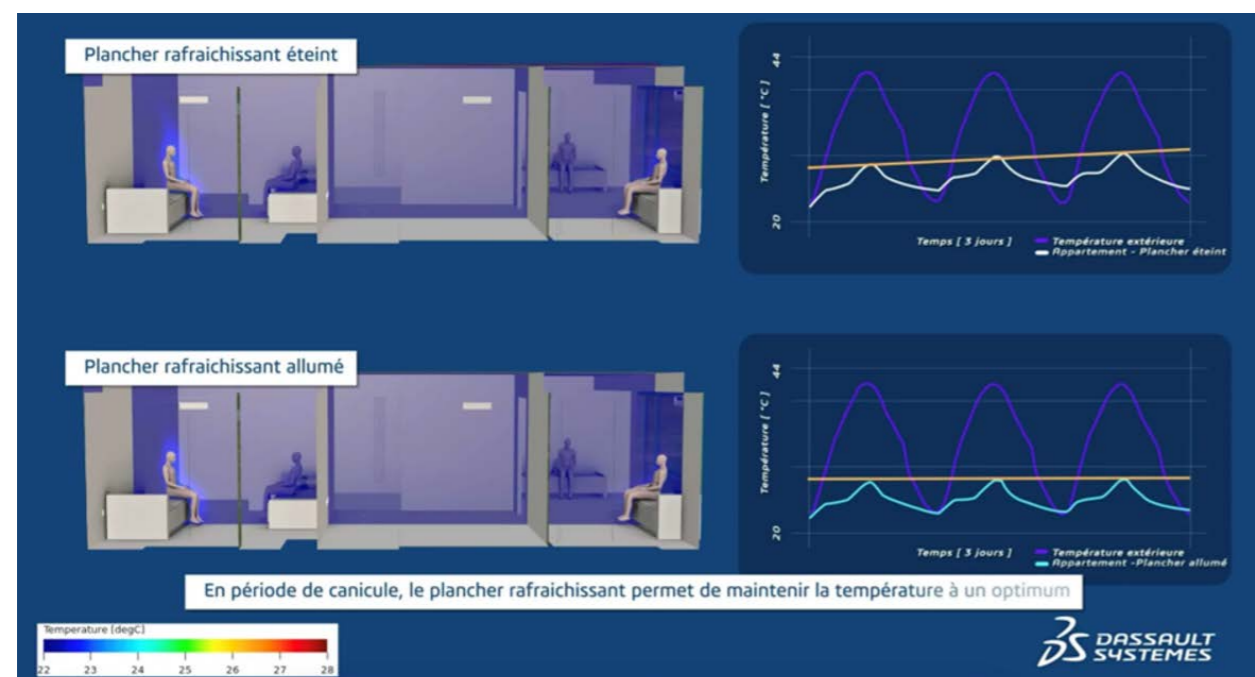


- Sans surprise le plancher rafraichissant permet de rafraichir l'ambiance dans les appartements.
- Par contre, il accentue la **stratification du champ de température**.

19 **SIMULIA**

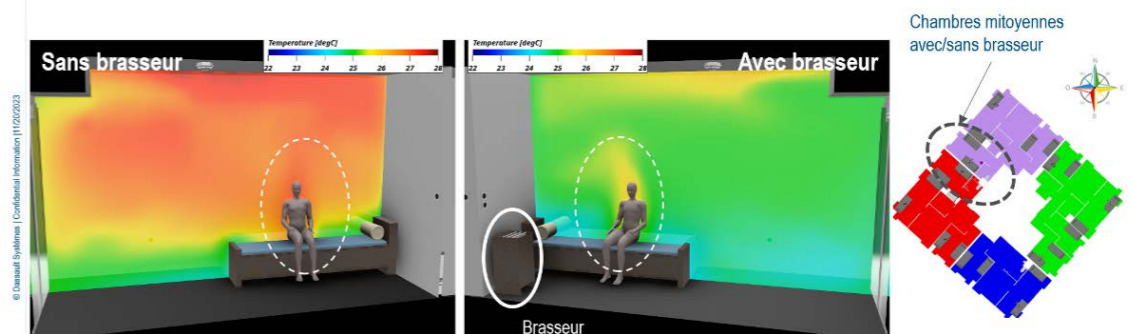
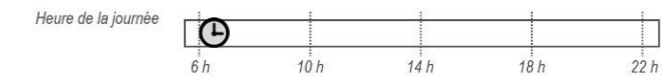
DASSAULT SYSTEMES

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

RESULTATS 3D Effet du brasseur d'air



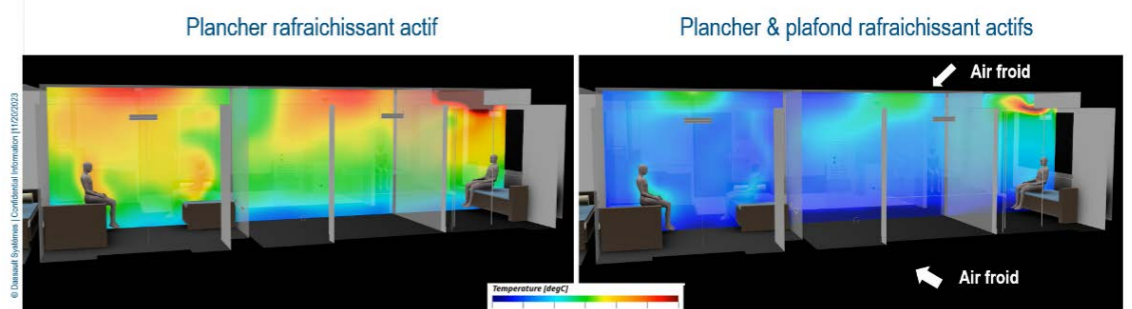
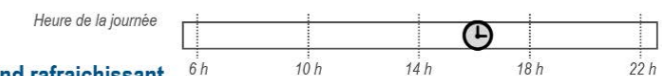
- Le brasseur d'air **réduit la stratification**
- Apporte une **baisse globale de la température** dans la chambre
- Par le mouvement d'air il **réduit la zone d'air chaud autour de l'athlète**

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).

RESULTATS 3D Effet combiné du plancher & plafond rafraichissant



- Prendre en compte l'effet rafraichissant du plafond permet de réduire l'impact de l'air chaud entrant.
- Le fait d'avoir de l'air frais en hauteur permet aussi de bénéficier des effets de densité pour maximiser l'effet refroidissant.
- Les **pertes thermiques au plafond ont donc un effet favorable**
- Cet effet bénéfique ne sera pas perçu au dernier étage

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.

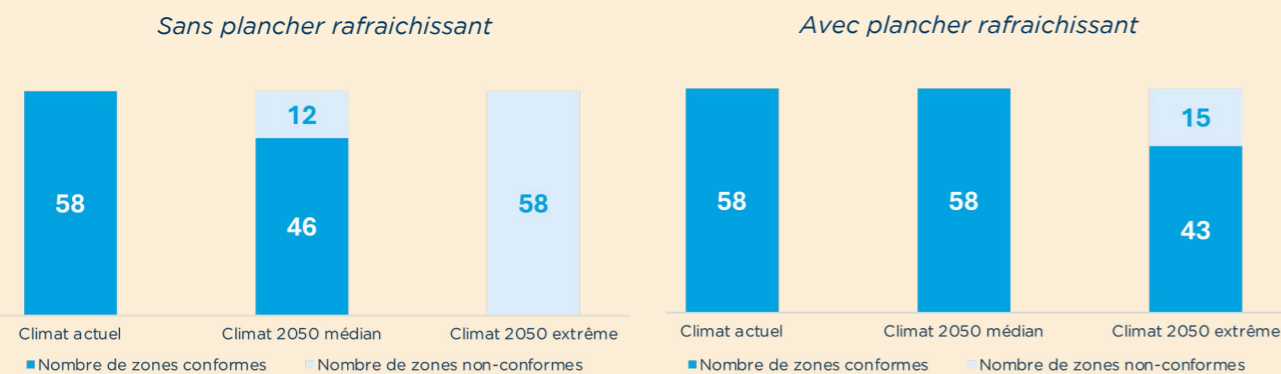


La simulation pour anticiper les besoins en froid

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.



Représentation du nombre de zones conformes ou non selon la température opérative sans la présence d'un plancher rafraichissant (à gauche) ou avec la présence d'un plancher rafraichissant (à droite)

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

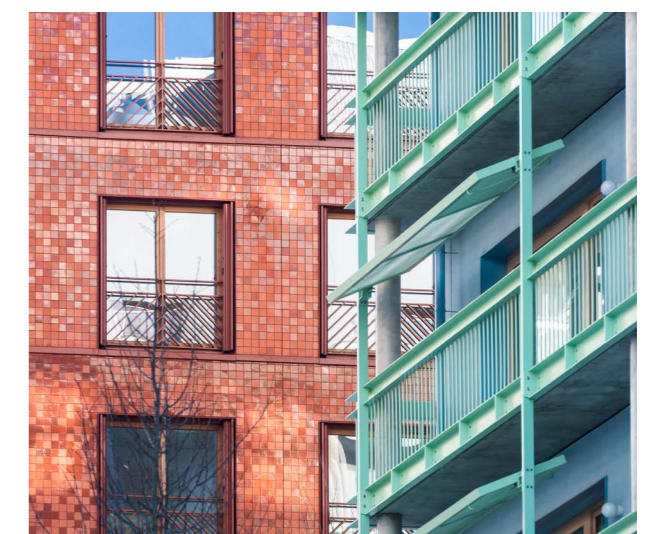
circulation. Ces espaces restent modestes et leur équipement en général peu développé, pour des raisons de gestion. La conception a cependant esquissé une première brique de réponse que les futurs occupants et gestionnaires pourront renforcer.

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 extérieurs ;

- 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 :

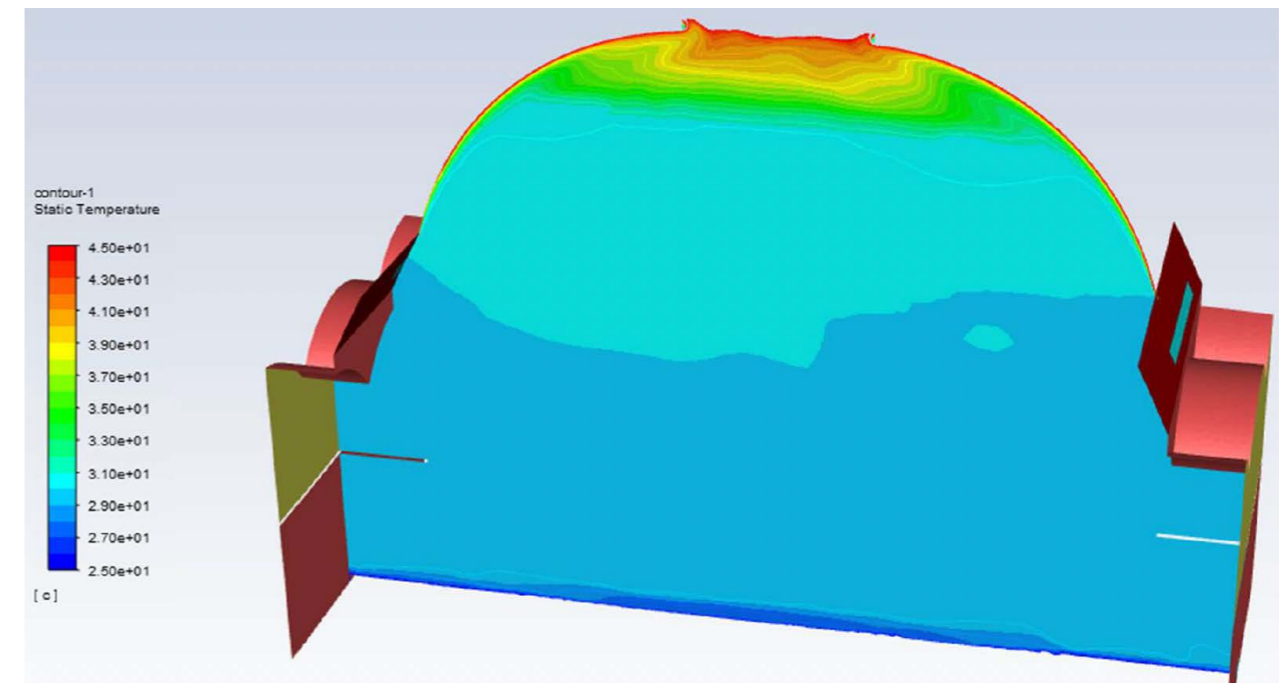
- La mise en place d'une dalle active. Après la démolition de l'ancienne dalle, le terrain a été remodelé avant d'y installer un isolant thermique. 46km de tubes caloriporateurs ont été

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 150 m² 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 sur le Village Olympique et Paralympique. 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.

Le procédé GreenBow, développé par l'entreprise Nereus, permet le traitement des eaux usées et sa réutilisation pour l'irrigation de la végétation. 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.

En 2024, SOLIDEO a déposé une demande de dérogation auprès de France Expérimentation pour la mise en œuvre de ce projet innovant. En effet, le dispositif semblait présenter des spécificités techniques rendant difficile l'analyse de sa conformité réglementaire, compte-tenu des taux de rejets prévus en azote et en phosphore au sein d'une zone sensible à l'eutrophisation. Il en ressort que la problématique a été solutionnée à la faveur d'une révision de l'arrêté du 21 juillet 2015, intervenue le 10 juillet 2024.



Une solution innovante de lutte contre les îlots de chaleur à l'image du projet COOLGROUND

CoolGround (entreprises Emulithe, Vertuo et Seureca, Alkern, Agence Parisienne du Climat) est un dispositif de lutte contre les effets d'îlots de chaleur urbain.

Il 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.

Le principe est de collecter et stocker les eaux pluviales dans la chaussée afin de les restituer en temps voulu. En période chaude et sèche, un système de serpentins et de pompes fait circuler l'eau en sous-face des pavés et permet leur « transpiration » afin d'irriguer la végétation environnante et de créer une sensation de fraîcheur de l'espace public.

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, un système de serpentins sous chaussées réservoirs, des pompes, et une station météo

pour le pilotage de l'ensemble du dispositif. Ce système innovant, entièrement pilotable à distance, est complété par une station météo permettant d'indiquer s'il est nécessaire ou non de déclencher le dispositif. 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, prévu à partir de 35 degrés, 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.



Pavés coquillages (à gauche) et bacs végétalisés (à droite)

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 ainsi souhaité créer les conditions favorables à une gestion optimisée des innovations mises en œuvre, avec plusieurs objectifs clés :

- Assurer une gestion optimale des dispositifs innovants, afin d'en maximiser les bénéfices en matière de confort d'été dans l'espace public, tout en maîtrisant les consommations de fluides et en limitant les éventuelles nuisances associées ;
- Mettre en place une communication efficace avec les habitants, en anticipant les situations de crise, notamment par la création de cartes dynamiques des îlots et des parcours de fraîcheur, enrichies par des données mesurées sur le terrain ;
- Évaluer l'impact des dispositifs bioclimatiques, de la végétation et des solutions innovantes telles que CoolGround sur le microclimat du Village, afin de tirer des enseignements concrets pour la gestion des îlots de chaleur urbains ;
- Concevoir des innovations et des outils de suivi répliquables, pouvant être étendus à l'échelle du territoire de Plaine Commune, voire nourrir les réflexions autour de futurs documents de planification tels que les PLU, 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'École 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 étudie 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 vont documenter durant cinq années les effets des aménagements réalisés, afin d'étudier l'effet à moyen terme des innovations et de l'accroissement de la végétation. Les premiers résultats sont illustrés ci-après.

Par ailleurs, les mesures satellitaires réalisées par Murmuration en 2023 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 routière durant les Jeux. Cette zone accueillera prochainement le Parc Ampère, un abaissement des températures y sera donc observable à l'avenir.

Par ailleurs, les analyses réalisées par l'IPSL durant l'été 2024 sur le Village des athlètes montrent la présence de plusieurs régimes météorologiques, qui dépendent de facteurs tels que la direction et vitesse du vent en surface et en altitude. Le comportement du Village change en fonction des régimes.

Le régime turbulent se caractérise par un fort brassage d'air, qui produit des écarts de température plus importants entre le jour et la nuit (jusqu'à 10,5°C) mais aussi des écarts réduits entre le Village et la station de référence en plein cœur de Paris (de l'ordre de 0,5°C). Dans ce régime, les effets micro-locaux des aménagements bioclimatiques sont peu prononcés mais il est également moins probable qu'une canicule se manifeste.

Dans les régimes intermédiaire et surtout stagnant, la situation est inversée : on observe des écarts inférieurs entre jour et nuit (de l'ordre de 6 °C), dus à une capacité de refroidissement plus faible la nuit dans les milieux urbains qu'en condition turbulente. C'est dans ce cas que les effets des aménagements bioclimatiques sont les plus bénéfiques. On y constate d'ailleurs des différences plus marquées par rapport à la place de l'Opéra, pouvant atteindre les 2°C.

D'après la figure ci-dessus, on décèle au sein du régime stagnant trois sous-régimes dépendant de la direction du vent :

- Dans le cas d'un vent d'ouest, les écarts jour-nuit sont prononcés (jusqu'à 9°C), les stations affichent environ 1°C d'écart entre elles et jusqu'à 1,5°C avec Opéra. De surcroît, les températures remontent graduellement durant la journée.

- Dans le cas d'un vent d'est, les espaces de pleine terre et proches de la Seine se refroidissent plus rapidement le soir que les espaces fortement bâtis. En revanche, les températures mesurées par les stations du Village augmentent très rapidement dès le matin ;
- Dans le cas d'un vent de sud, la chaleur de Paris vient influencer le Village et on obtient des écarts réduits jour-nuit, entre stations et même avec Opéra. Les vents de sud et est peuvent même générer un régime dit super-stagnant où les effets sont exacerbés, avec un faible refroidissement de nuit et une augmentation rapide des températures le matin.

En synthèse les études montrent que la trame verte et bleue du Village des athlètes permet un rafraîchissement plus rapide le soir, entre 19 h et 22 h, dans le régime stagnant et en particulier en cas de vent d'ouest. Ceci peut se révéler bien utile en période caniculaire.

En revanche, il existe des conditions météorologiques dans lesquelles les aménagements ne peuvent pas avoir d'effet appréciable, notamment dans les cas de régime turbulent et de vent de sud. Durant ces épisodes, il est préconisé de faire recours aux zones refuge : bâtiments rafraîchis, innovations des espaces publics telles que les aérophiltres (voir page 157), etc.

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.

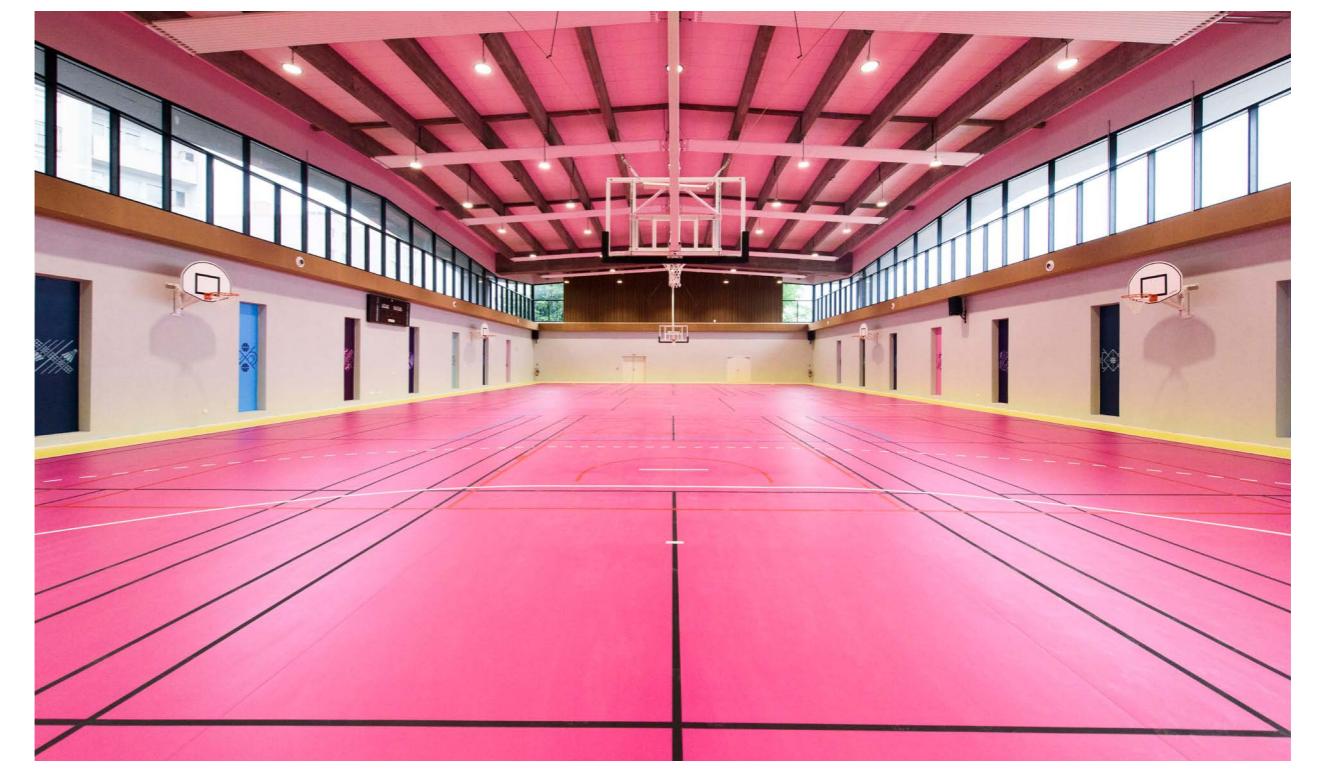
1. Assurer un air sain dans les logements et équipements sportifs

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.

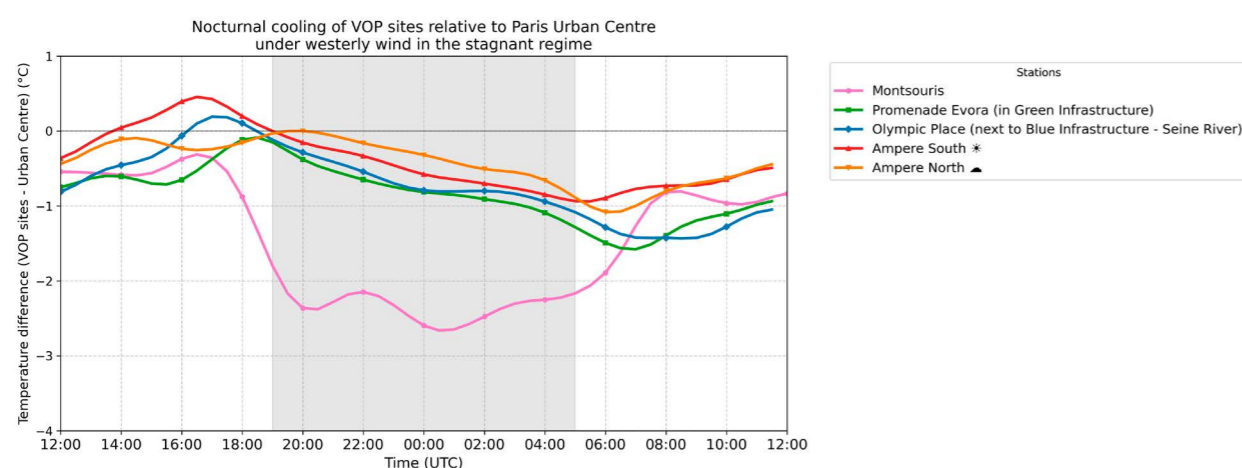
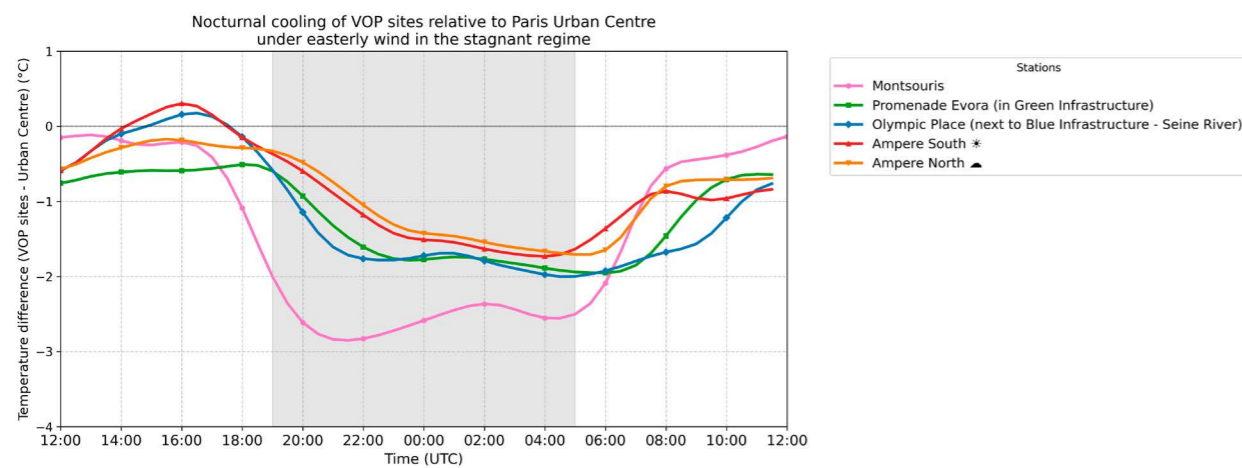
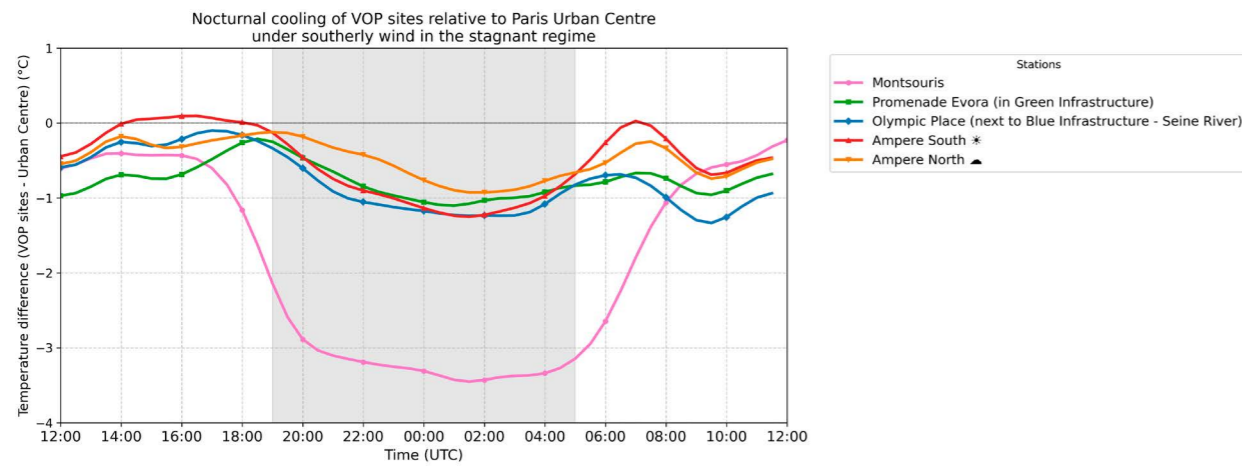
L'enjeu est renforcé par les émissions de la circulation routière, de nombreux ouvrages se situant à proximité d'axes routiers majeurs (l'A1 pour le CAO et le Village des athlètes, le périphérique pour l'Arena Porte de la Chapelle). Les prescriptions intègrent donc

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



Refroidissement nocturne du Village des athlètes selon différentes directions du vent en régime stagnant

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).

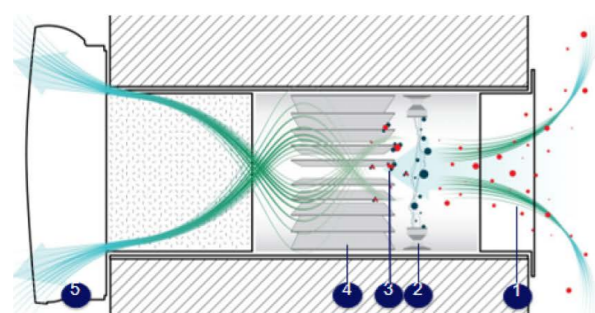
Cette solution, portée par l'entreprise ALDES, comprend des filtres électrostatiques haute performance implantés sur l'ensemble des sorties d'air exposées. Elle permet d'atteindre les niveaux de filtration d'une ventilation de type double-flux, dont la généralisation serait complexe et coûteuse sur des 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 10 µmu et 80% pour celle de 2,5 µmu, enfin de 77% pour les bactéries d'1 µmu.

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



- 1 L'air extérieur est pollué en particules.
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.
- 2 Les ions sont attirés par les particules fines et forment un **amalgame « Ion - Particules »**.
Efficace aussi sur les bactéries pour celles fixées aux particules.
- 3 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.
- 4 Le flux d'air entrant dans le logement est filtré pour un **air plus sain**.

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



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. L'ambition est de construire le cadre de référence national d'une garantie contractuelle de la qualité de l'air intérieur.

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 permet 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 de 12% la consommation d'énergie liée à la ventilation.

Pour ce faire, le projet a mis en place 3 solutions de filtration distinctes associées à un pilotage intelligent des centrales de traitement d'air (CTA) :

- des filtres absolus dans un des compartiments du bâtiment, avec des taux d'abattement en particules fines visés entre 65 et 95 % selon leur taille ;

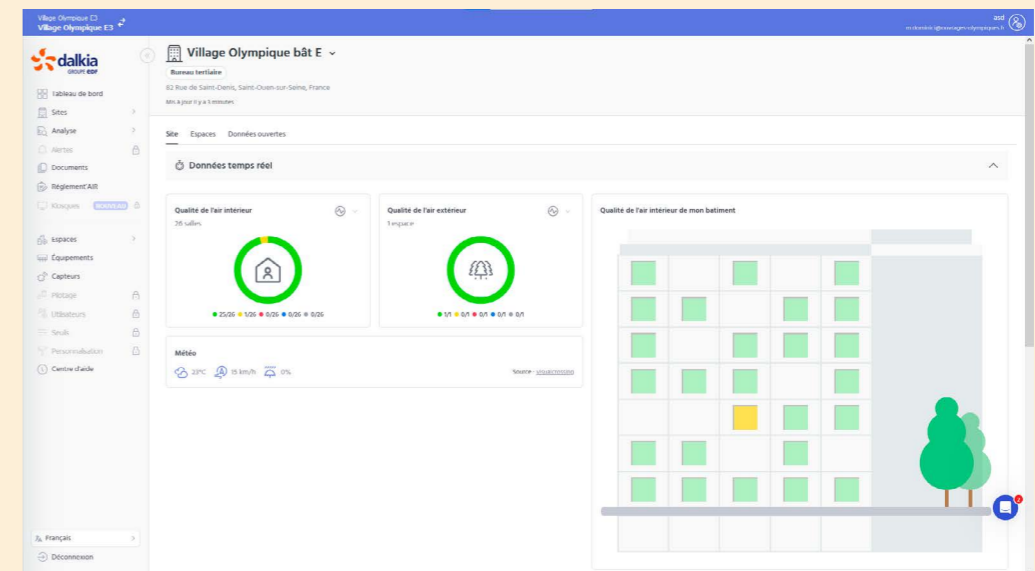
- une solution de phytoremédiation pour la CTA du RDC, visant un fort abattement des niveaux du NO₂ et des polluants COV de la pièce ;
- des filtres classiques F7, F9 sur les autres centrales d'air.

Des mesures fiables en temps réel sont possibles grâce à l'utilisation de capteurs mesurant les polluants de l'air extérieur et intérieur, dont les données sont envoyées vers une plateforme internet dédiée. Un système de pilotage prédictif auto-apprenant a également été mis au point.

Une exception est représentée par la solution de phytoremédiation, qui a rencontré de nombreux problèmes techniques et administratifs, ce qui a conduit à l'arrêt du contrat avec le fournisseur. Les délais de livraison contraints ont finalement conduit au choix d'un mur végétal classique, ne présentant pas la fonctionnalité de filtration d'air.

Après la période des Jeux, durant laquelle une exploitation plus classique du bâtiment a été réalisée, des tests et mesures in situ sont en cours pour évaluer les performances du dispositif.

Fair Play – Tableau de bord de la qualité de l'air



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 le 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, responsables de l'odeur caractéristique des halles bassins, se forment lorsque le chlore utilisé pour la désinfection de l'eau réagit avec des matières organiques (sueur, salive, etc.). La concentration en trichloramines dans l'air dépend de plusieurs facteurs, dont la qualité de l'eau, le taux de chlore libre et la gestion des pratiques d'hygiène des baigneurs. Ces composés sont des agents irritants, susceptibles de causer des pathologies, en particulier chez le personnel exploitant de ce type d'établissement qui est y souvent exposé.

La SOLIDEO a donc souhaité imposer des objectifs très restrictifs en définissant un seuil de concentration maximal de 0,2 mg/m³, soit bien inférieur à la valeur limite d'exposition professionnelle définie à 0,5 mg/m³.

• **Optimisation de la filtration** : Le système de filtration des eaux est primordial pour assurer une bonne qualité de l'air intérieur. Les systèmes de filtration à diatomée ou à perlite permettent une utilisation moindre de chlore pour le traitement de l'eau que les filtres à sable notamment (voir page 116).

• **Réduction du chlore dans l'eau** : Plus la concentration en chlore libre est élevée, plus la formation de trichloramines est rapide. Pour ce faire, 3 critères sont à surveiller :

- Le pH de l'eau. Un pH acide favorise la formation des trichloramines, tandis qu'un pH neutre réduit leur production. Il est estimé qu'une baisse du pH de 7,25 à 7 peut augmenter la production de trichloramines de 40 %.

- La température de l'eau. Une température élevée augmente les vitesses de réaction et de formation de la molécule mais aussi sa volatilité. D'après des travaux de l'INRS, il est estimé qu'une hausse des températures de bassin de 26°C à 33°C augmenterait de 40% la volatilité de la molécule. Toutefois, la relation entre température et volatilité

reste difficile à modéliser précisément, en raison du manque de données scientifiques robustes et de la complexité physico-chimique du composé.

- Le taux de chlore ajouté pour le traitement de l'eau. Il est recommandé de limiter la surchloration des eaux de baignade et d'utiliser à la place, par exemple, des déchloramineurs UV pour détruire les chloramines post-filtration.

• **Amélioration de la ventilation** : L'installation de systèmes de ventilation efficaces permet de réduire significativement la concentration en trichloramines dans l'air. Pour cela, les débits d'air au niveau de la CTA sont augmentés et modulés en fonction de l'humidité, de la température et des niveaux de trichloramine. Avec un débit de 3,5 Vol/h, le brassage de l'air est renforcé au-dessus de la halle bassin pour éviter les concentrations locales élevées et la stagnation. Des buses à longue portée sont utilisées pour traiter les zones vitrées et les plages.

Ces leviers ont été intégrés dans la construction de l'ensemble des piscines neuves du programme SOLIDEO pour garantir au mieux la conformité aux valeurs seuils de trichloramines.

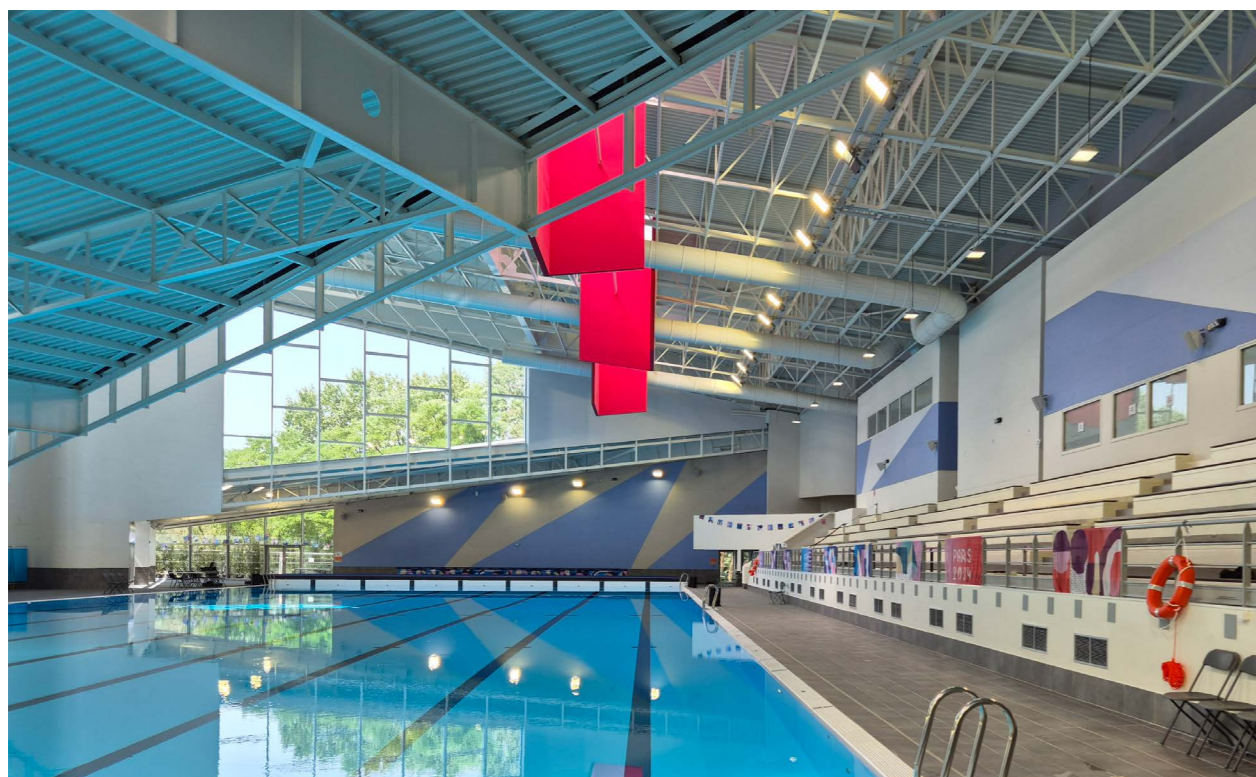
Les rénovations de piscines ne prévoyaient pas systématiquement d'agir sur l'ensemble de ces leviers. Pour la piscine Georges Vallerey, la concentration de trichloramines mesurée en amont des travaux montrait seulement un léger dépassement de l'objectif avec une concentration à 0,244 mg/m³ qui ne nécessitait a priori pour être corrigé ni le changement du système de filtration de l'eau ni l'installation de déchloramineur. Les équipes de maîtrise d'œuvre 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. La rénovation des installations de traitement de l'air a donc été privilégiée 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 dernière simulation a montré que le projet de rénovation de l'installation de traitement de l'air a permis une réduction de 27% de la concentration de

trichloramines.

Concernant la piscine Maurice Thorez, une désinfection par électrolyse a été privilégiée pour diminuer les besoins en chlore des eaux de bassin. Ce type de désinfection permet de dissiper directement dans l'eau des ions, le plus souvent d'argent et de cuivre, qui vont ensuite se lier avec les produits organiques par exemple. En association avec une très faible quantité de chlore, on accélère ainsi le processus de désinfection, ceci assure, avec un faible complément chloré, par exemple de 0,1 à 0,2 mg/L, le processus de désinfection est ainsi accéléré grâce aux déchloramineurs UV et assure une destruction radicale des contaminants microbiens et pathogènes.

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 de la halle bassin (température, humidité relative, CO₂ et trichloramines) et en agissant directement sur la ventilation en cas de dépassement de seuils. L'automatisation permet ainsi un suivi plus fin et continu de ces polluants.

La piscine de Colombes va également dans ce sens en souhaitant mettre en place un suivi en temps réel des taux de trichloramine et de chlore libre pendant les heures d'occupation. Des campagnes régulières de mesure, incluant deux tests quotidiens du taux de chlore et deux tests hebdomadaires des trichloramines dans l'air, sont réalisées au niveau des analyseurs et des régulateurs de chaque bassin. Ces campagnes complètent les prélèvements obligatoires imposés par l'ARS pour assurer le contrôle de la qualité de l'eau. Un asservissement de la plage de fonctionnement des déchloramineurs à la teneur en chlores combinés est prévu afin de permettre un réduit de fonctionnement à 60% lorsque la consigne est atteinte.

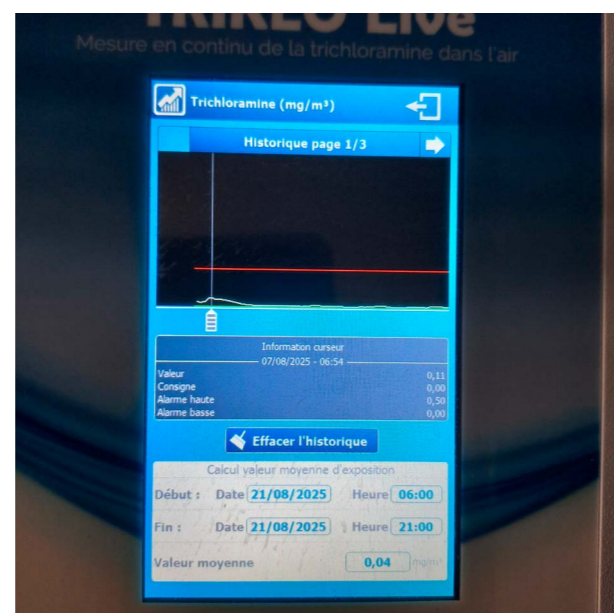


Piscine de Colombes

L'efficacité des solutions contre les trichloramines est mesurée par des analyses régulières tout au long de la phase d'exploitation. La SOLIDEO, les maîtres d'ouvrage mais surtout les exploitants de ces ouvrages pourront donc, après quelques mois d'utilisation, valider l'atteinte des objectifs.

Après deux mois et demi d'ouverture du Centre Aquatique Olympique, les mesures de trichloramines dans l'air montrent que les valeurs sont largement conformes aux engagements pris par la maîtrise d'ouvrage et l'exploitant du complexe sportif. Le tableau ci-dessous les résultats de 86 jours de mesures des taux de trichloramines dans l'air mesurées dans 4 typologies de bassins. La moyenne observée pour chacun d'eux est conforme à l'objectif de 0,2 mg/m³. De plus, les plages de valeurs observées sont elles aussi considérées comme conformes aux attentes avec peu de valeurs mesurées au-dessus de l'objectif, à l'exception du bassin ludique. Celui-ci présente 17 % de ces valeurs supérieures à l'objectif, ce qui s'explique du fait de la présence plus importante de matières organiques (peau, urine, etc.) dans ce type de bassin par rapport à un bassin de nage sportive. La piscine étant ouverte depuis très peu de temps

également, il convient de considérer une période d'ajustement des équipements et des systèmes de traitement avant de formuler une évaluation définitive.



Ecran de l'appareil analyseur de trichloramines dans l'air de la salle bassin de nage du CAO

Synthèse des taux moyens de trichloramines dans l'air en mg/m³ des différentes typologies de bassin du CAO

Taux des trichloramines dans l'air (mg/m ³) / Typologies de bassin	Plongeon	Nage	Apprentissage	Ludique
Valeur moyenne	0,11	0,11	0,05	0,14
Valeur la plus basse	0,1	0,1	0,1	0,02
Valeur la plus haute	0,24	0,28	0,15	0,30
Nombre de valeur au-dessus de l'objectif	5	4	0	15

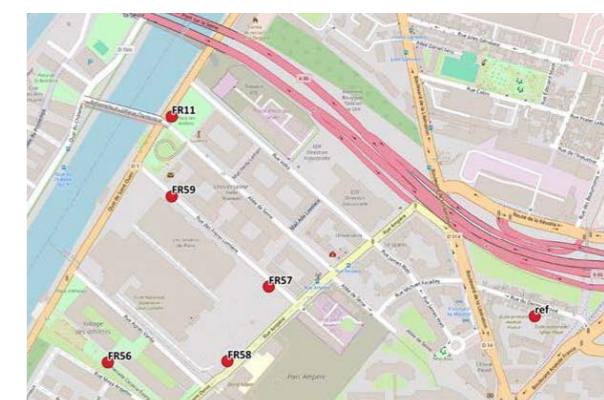
2. Des innovations pour agir sur la qualité de l'air extérieur

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 :

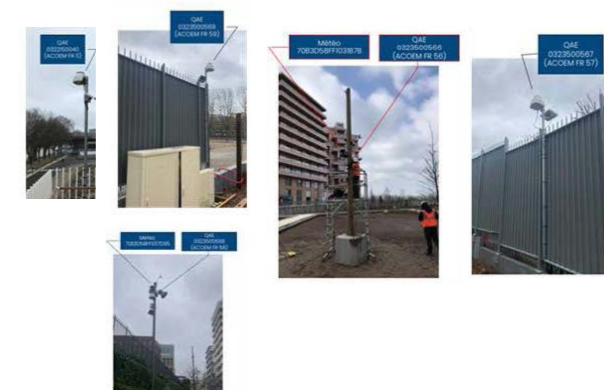
- la conception d'ouvrages visant à favoriser les déplacements doux (aménagement et valorisation de cheminements piétons et de pistes cyclables, connexion facilitée aux transports en commun, pistes cyclables...) ;
- la mise en place, à une échelle très localisée, de solutions innovantes de traitement de l'air extérieur contribuant à préserver le confort et le caractère accueillant des espaces extérieurs.

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 et de 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 disponibles sur le site internet d'Airparif.

Localisation des capteurs de qualité de l'air



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. En tant qu'aménageur de la ZAC du Village Olympique et Paralympique et au titre de la supervision du projet de réaménagement de l'échangeur Pleyel porté par la DIRIF, la SOLIDEO a été l'un des signataires du Protocole d'accord relatif à la qualité de l'air et du bruit autour du quartier Pleyel à Saint-Denis aux côtés de l'État et de Plaine Commune.

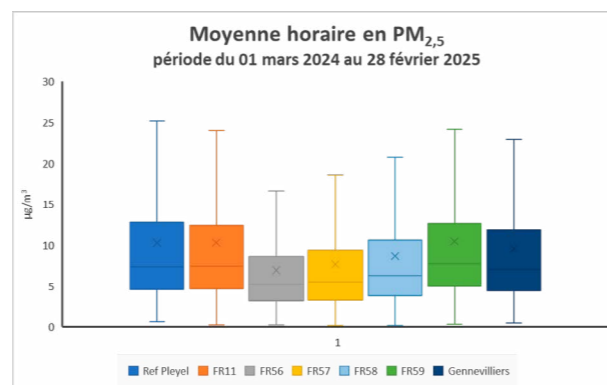
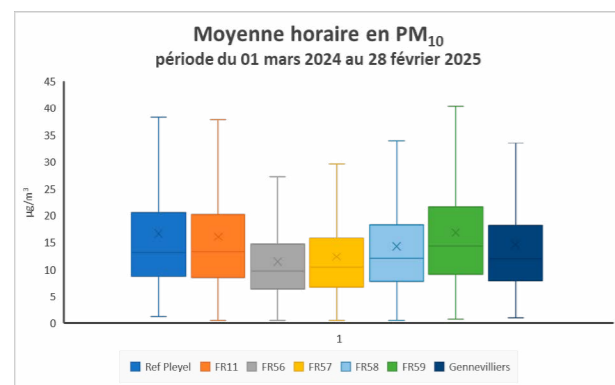


Les mesures ont montré que la qualité de l'air du Village est principalement influencée par la proximité des axes routiers majeurs, notamment l'autoroute A86. C'est sur la Place des athlètes, au Nord de la ZAC et à proximité immédiate de l'autoroute A86, que l'on constate les niveaux de pollution les plus élevés. A l'inverse, la Promenade Cesária Évora, zone la plus éloignée du trafic automobile, constitue le niveau de fonds dont les valeurs sont comparables à celles de la station Airparif la plus proche, située dans la cour de l'école Anatole France.

L'expérimentation a permis de confirmer la pertinence du déploiement du réseau de capteurs. Les bonnes corrélations et à la bonne reproductibilité des mesures fournies par ces capteurs les rendent particulièrement

pertinents pour l'analyse de la variabilité des PM 2,5 et l'étude des relations entre conditions météorologiques et qualité de l'air. Ainsi, Plaine Commune a décidé de pérenniser ces capteurs, afin de permettre à l'IPSL de prendre le relais d'Airparif dans le travail d'analyse, dans le cadre du projet de recherche inteGREEN, qui étudie de manière holistique les effets de la végétalisation sur le milieu bâti.

Il serait également intéressant de positionner un capteur à côté d'une station Airparif, afin de détecter toute dérive dans les mesures qui peut se produire après plusieurs mois de fonctionnement sans recalibrage.



Distribution des concentrations moyennes horaires en PM10 et PM2.5 en comparaison aux sites de référence

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 déployée sur les espaces publics du Village Olympique et Paralympique 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.



Une solution innovante d'assainissement de l'air dans un espace extérieur ouvert : les aérophiltres

Sous la forme de larges ombrières, les aérophiltres assurent un double enjeu en créant de l'ombre en surplomb d'un mobilier urbain inclusif et en assainissant l'air de la Place des athlètes. 5 d'entre elles sont en effet équipées d'une solution de capture par abattement électrostatique des particules fines, dont les taux de concentration sont relativement élevés à cet endroit du Village des athlètes en raison de la proximité immédiate de l'autoroute A86.

Fonctionnant avec l'électricité statique pour l'abattement et avec 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.

Les ombrières sont activables en fonction des niveaux de pollution ambiante, de la météo et de l'affluence. L'air filtré se mélangeant ensuite à l'air extérieur, l'effet du dispositif dépend beaucoup des conditions de vent.

En sortie de l'appareil, un taux d'abattement de la pollution de 90 à 95% est observable. Les particules PM 10, PM 2,5, voire les PM 0,1, sont capturées au moment du passage de la circulation de l'air dans l'appareil grâce à un champ électrostatique. L'installation des 5 ombrières doit permettre la dépollution d'environ 100 000 m³/h. Malheureusement, une fois éloigné des dispositifs, un abaissement significatif du niveau de pollution n'a pu être mesuré.

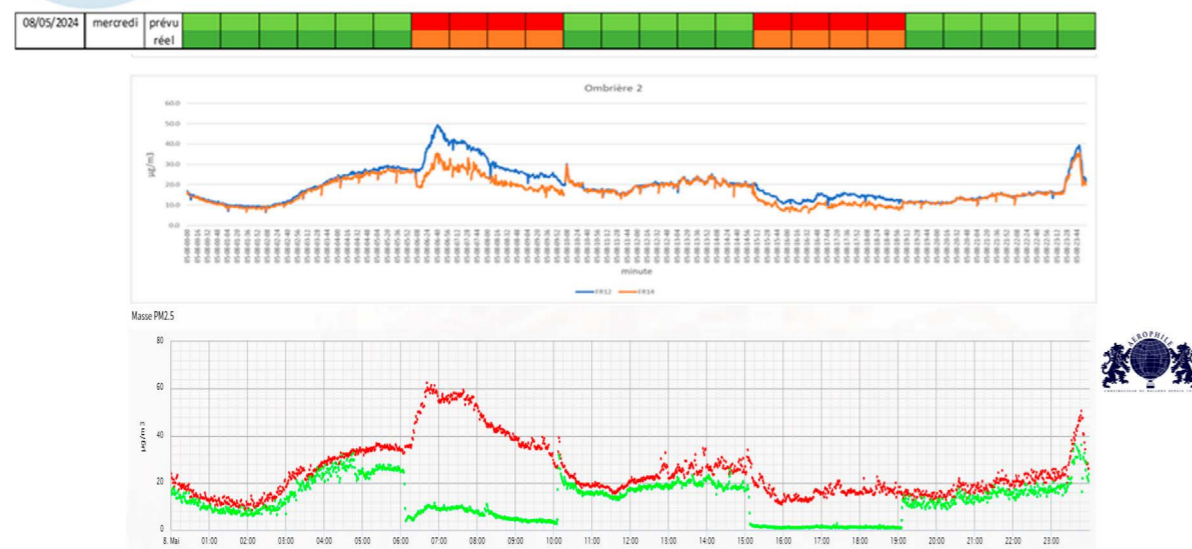


Aérophiltres présents sur la Place des athlètes

Une expérimentation a été réalisée durant le deuxième trimestre 2024 en partenariat avec Airparif. Six capteurs de qualité de l'air Kunak ont été installés sur les aérophiltres, certains à proximité du mobilier d'assise et d'autres plus éloignés des appareils. Les aérophiltres ont été actionnés en suivant un protocole défini chaque semaine en fonction des prévisions météorologiques. Le rapport d'Airparif montre 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.

PM_{2.5} EXEMPLE JOURNÉE DE FONCTIONNEMENT



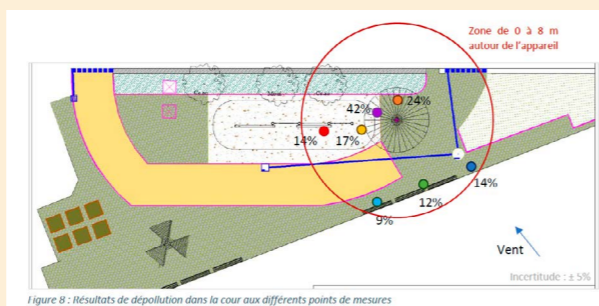
Graphique du haut : Niveaux de particules PM_{2.5} en entrée (courbe bleue) et au pied (capteur local) des aérophiltres (courbe orange)

Graphique du bas : Niveaux de particules PM_{2.5} en entrée (courbe rouge) et en sortie directe (capteur interne) des aérophiltres (courbe verte)

En comparaison avec des résultats en laboratoire et des résultats d'autres cas d'étude, les résultats préliminaires de cette expérimentation révèlent que le périmètre d'influence des aérophiltres est ici réduit en raison d'une forte dominance des vents sur la Place des athlètes. Pour de futurs déploiements de cette innovation, il conviendra de privilégier des endroits extérieurs plus abrités ou bien des endroits intérieurs où une faible ventilation naturelle peut conduire à une accumulation de particules fines. Il peut être en ce sens intéressant de s'intéresser à, un autre aérophiltre qui, à la demande de la Ville de Saint-Denis, a été installée dans la cour de l'école Anatole France de Saint-Denis, elle-aussi située à proximité immédiate de l'autoroute mais dans une configuration plus abritée.

Les résultats d'une campagne de mesure des niveaux de PM_{2.5}, réalisée par l'entreprise ayant fourni les aérophiltres, montrent que l'abattement de particules par l'appareil est des mêmes ordres de grandeur que ceux de la place des athlètes. En revanche, grâce à la situation plus abritée, dans la cour de l'école

les effets de l'aérophiltre sont appréciables jusqu'à 8 m de distance.



Taux de dépollution de l'aérophiltre dans la cour de l'école Anatole France

Sur le Village olympique, le dispositif a également montré son intérêt pour le confort des athlètes, et désormais des riverains, lors des pics de chaleur en apportant de l'ombre et une sensation de fraîcheur, ce qui constituent des contributions supplémentaires de ces ombrières aux objectifs de résilience et d'adaptation au changement climatique.



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.

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 aérophiltres, 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 etc.



**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 ha 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.

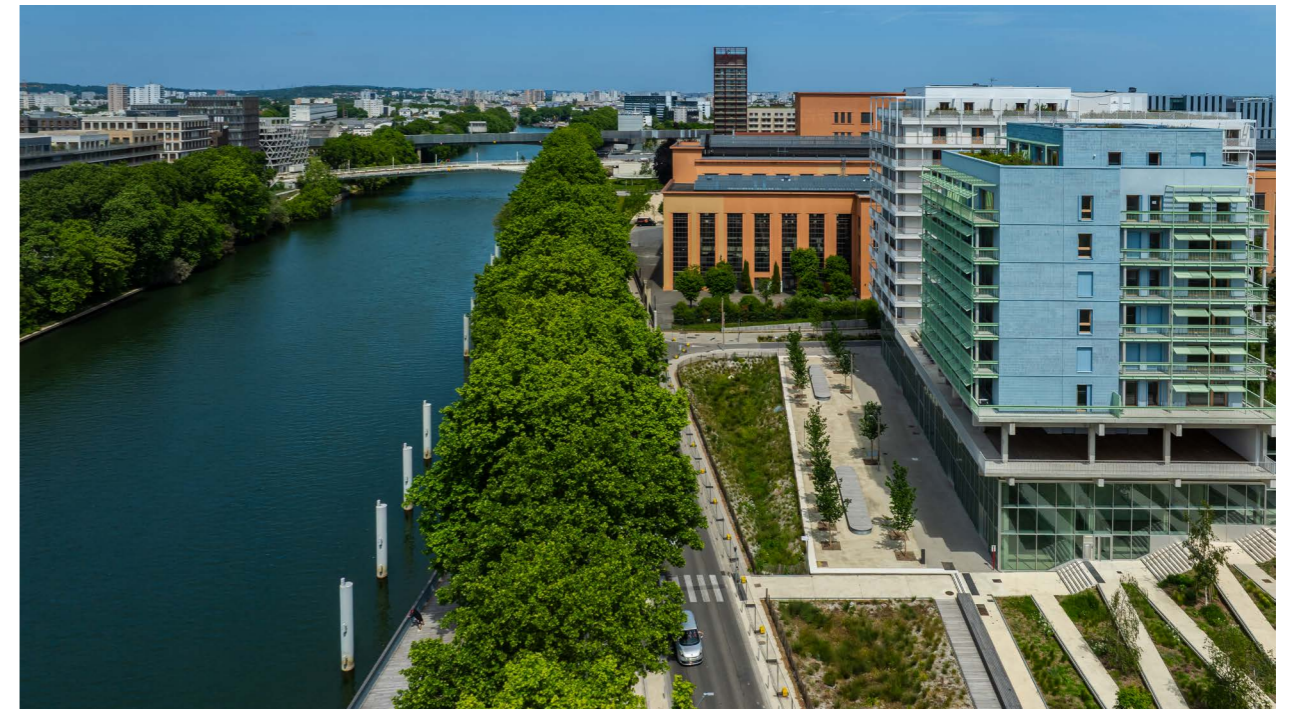
La Colline d'Elancourt fait également l'objet d'une mesure de compensation liée au défrichement de 15 571 m² de boisement au sens du code forestier, compensé par la réalisation de travaux d'amélioration sylvicole (remplacement du Robinier par des espèces forestières indigènes) et de valorisation écologique sur site sur une surface de 18 000 m².

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.



Perspective du village des athlètes le long des berges de seine

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 noire⁶. 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.

6 - 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 177). 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

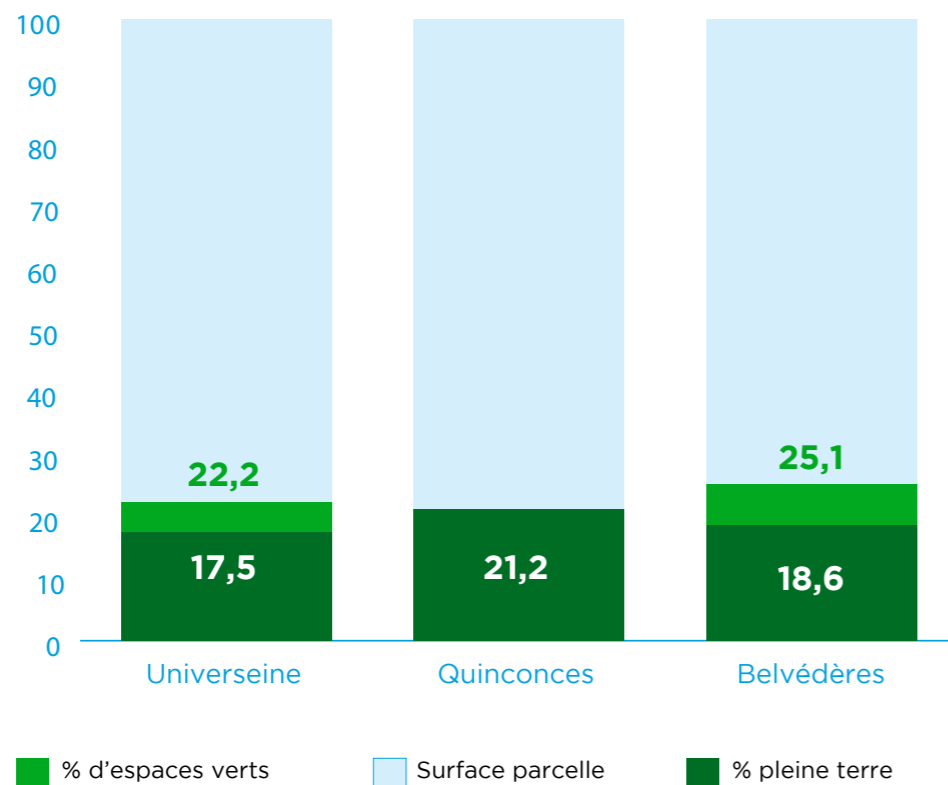
2,85 HECTARES*

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 Olympique et Paralympique se complètent actuellement avec la transformation de la gare routière utilisée en phase Jeux en un grand parc, le Parc Ampère. Futur cœur de biodiversité du quartier, il accueillera un bois d'environ 3 hectares en pleine ville créant un lieu de vie pour les habitants et un habitat pour la flore

et la faune. Les aménagements paysagers s'achèveront en 2026 et seront suivis de la pose de mobilier à l'été. Les usages et l'accessibilité du parc seront modulés par Plaine Commune 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 du secteur F.



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.

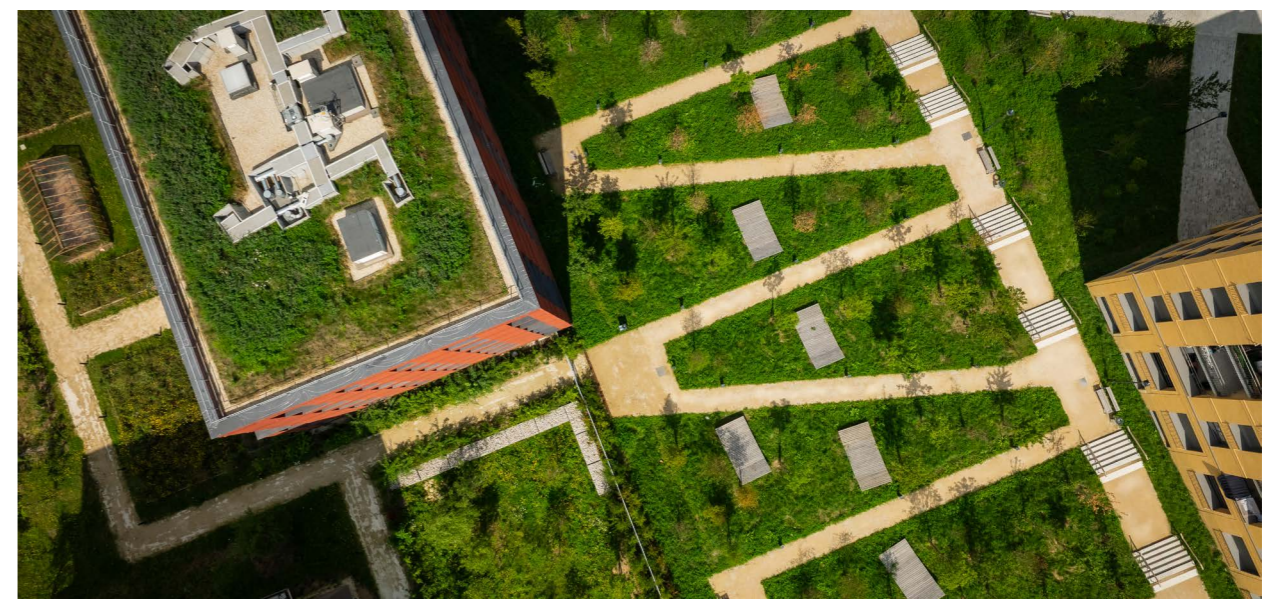
La limitation de l'imperméabilisation des sols et la préservation de pleine terre au sein des projets (cœurs d'îlots privés, espaces publics, parc urbain...), réduisent l'impact de l'urbanisation sur la nappe par l'infiltration directe des eaux de pluie dans le sol (et non intégralement rejetées en réseau 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 privés, y sera réalisée en zéro-phyto, limitant ainsi le risque de pollution.



Espaces végétalisés en cœur d'îlots du secteur Aire des Vents

2. Créer des sols fertiles sur site pour limiter les apports extérieurs

a. Dépolluer pour réutiliser : 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.



L'exemple du Terrain des Essences

La SOLIDEO a déposé auprès de la DRIEAT un dossier d'autorisation environnementale unique comprenant notamment une étude d'impact et un dossier de dérogation pour la destruction d'habitats d'espèces protégées. 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 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.

Les travaux de dépollution ont également permis d'améliorer l'état de la nappe puisque cette dernière a été dépolluée en partie dans la zone Sud. Seulement 1,5 m³ de matière en suspension dans l'eau (dit flottant) a été pompé au droit de la nappe par skimmer et par boudins absorbants.



Opérations de dépollution des sols et de la nappe du Terrain des Essences



Zone sud du Terrain des Essences

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 géolo-

giques avant de définir, à partir de ceux-ci, la composition des substrats fertiles à reconstituer par le recours à des technosols. Ces sols 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.

Composition détaillée des mélanges de technosols

Mélange 1		Mélange 2	
Béton concassé	20%	Béton concassé	50%
Remblais	60%	Remblais	20%
Compost	20%	Compost	30%

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 680 m³ de substrat constitué de deux mélanges différents.

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 6 060 m³ 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 : 4 940 m³ (35%),
- Technosol produit à Bruyères-sur-Oise : 6 740 m³ (48%),
- « Terre utile » recyclée : 2 355 m³ (17%).

Ainsi, 9 095 m³ (65%) de substrat recyclé ont été utilisés. Le mélange terre pierre, initialement 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 œuvre.

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 ».



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 épi-gés et endogés, ainsi qu'à de nombreux autres insectes, araignées, bactéries, protozoaires, nématodes, coléoptères, mollusque, etc.



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.

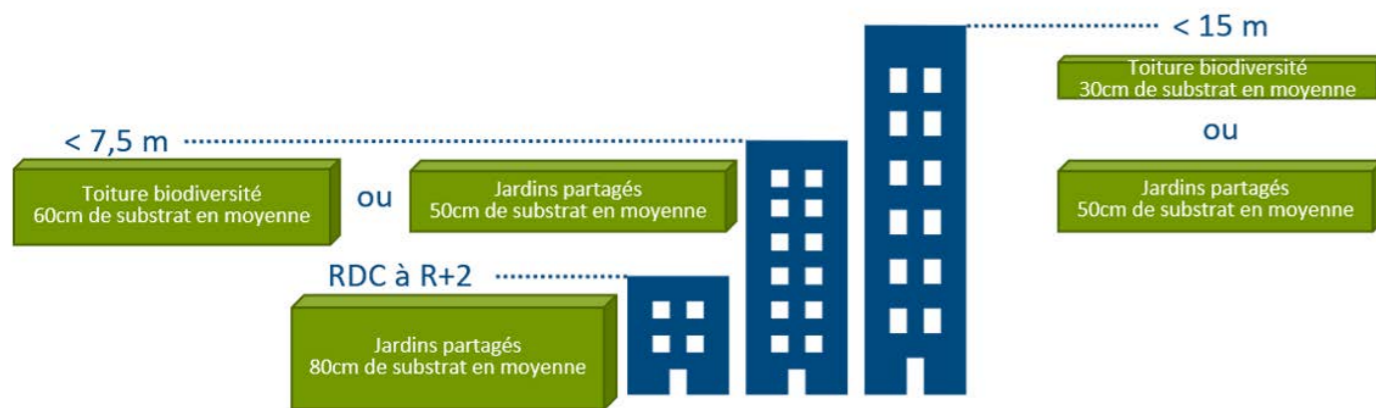
Dans le cas des toitures équipées de panneaux solaires, les toitures biosolaires, c'est-à-dire combinant végétalisation et panneaux photovoltaïques, sont privilégiées. Afin de garantir la richesse et la pérennité des fonctions éco-

logiques de ces installations, des épaisseurs de substrat minimum sont définies et le choix des essences est adapté.

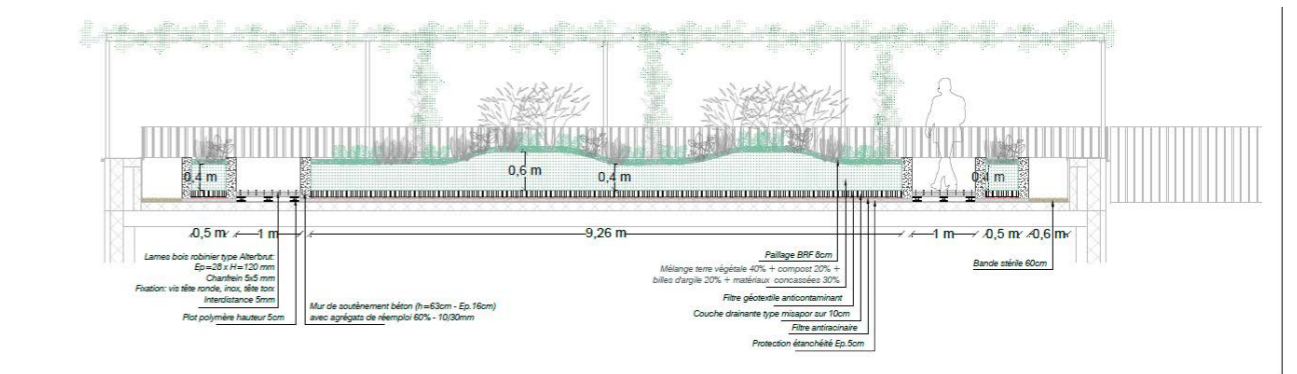
Au Village des athlètes, des jardins partagés avec 80 cm de substrat ont été installés sur les toitures jusqu'au deuxième étage. À R+3 (une hauteur inférieure à 7,5 m), les toitures sont dédiées exclusivement à la biodiversité (60 cm de substrat) ou accueillent des jardins partagés (50 cm de substrat). 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%.

Les piscines d'Aubervilliers et de Marville ont également tenu compte de cet objectif et présentent toutes deux un important taux de végétalisation de leurs toitures avec respectivement 41% et 54%.



Épaisseurs moyennes minimales de substrats prescrites sur les toitures des Villages des Athlètes et des Médias.



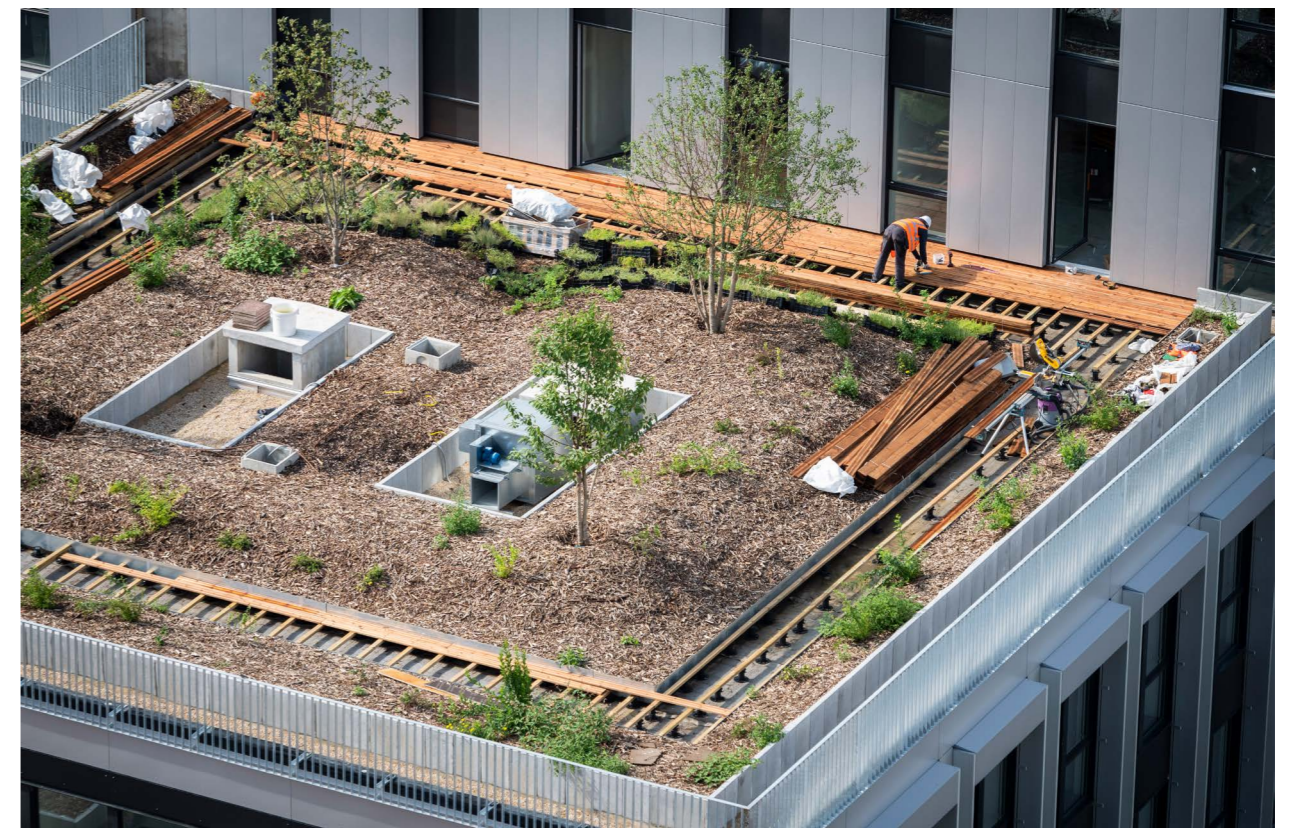
Coupe transversale d'une toiture végétalisée d'un bâtiment R+5 sur le secteur Universeine

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



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.

La mise en place ultérieure de capteurs et de sondes connectés (température, humidité, ensoleillement, etc.) à un service de contrôle à distance de la situation hydrique, dans le cadre d'un contrat avec le syndicat de copropriété, serait toutefois fortement recommandée pour suivre le bon fonctionnement du système et la réduction des consommations d'eau potable.



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

favorables à la faune qui ont été déployés. A titre d'exemple, le lot B2R du secteur Universaine 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.



Toitures des lots immobiliers sur le secteur Plateau

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 gîtant dans les tiges creuses et le bois, principalement les insectes comme les carabes.

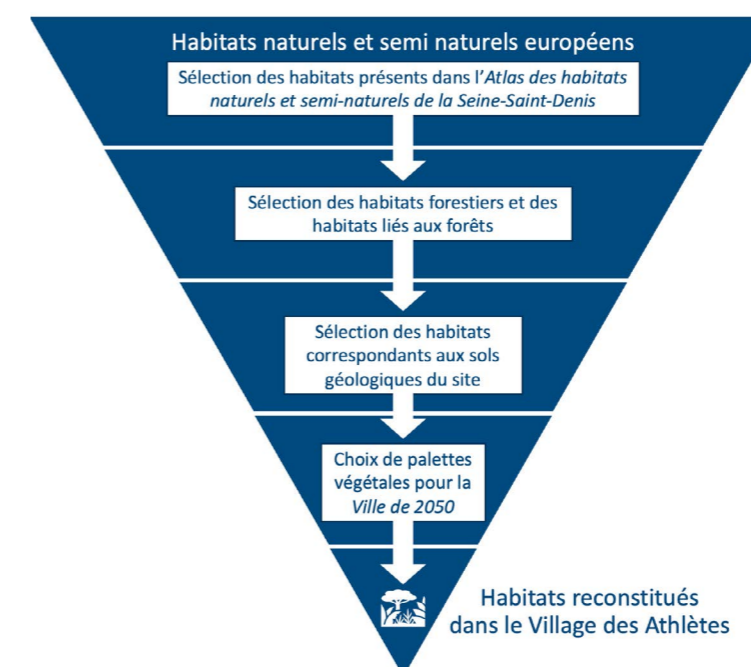
Enfin, en pied de mur, légèrement enseveli sous le sol, des aménagements enterrés permettent l'accueil d'espèces vivant dans les sols.

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



Clé de détermination des habitats

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.

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.



Légende

■ Chênaie sessiliflore	■ Chênaie-Frênaie
■ Ornaie rudérale	■ Chênaie jardin

Habitats reconstitués dans les espaces publics du VOP

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. 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 BiodiverCity Construction a fait partie des exigences du Cahier des Prescriptions d'Excellence Environnementale de la SOLIDEO sur les constructions neuves.

En parallèle, la SCCV Quinconces a également mis en place une ORE, Obligation Réelle Environnementale, avec les futurs exploitants. Les ORE sont des engagements contractuels portant sur la gestion environnementale des espaces verts et le suivi d'indicateurs de biodiversité sur une période minimale de 30 ans.



Vue aérienne des espaces végétalisés au sol et en toiture du secteur Quinconces



Focus sur le groupe scolaire de Saint-Ouen-sur-Seine

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.



Jardin pédagogique du groupe scolaire de Saint-Ouen-sur-Seine

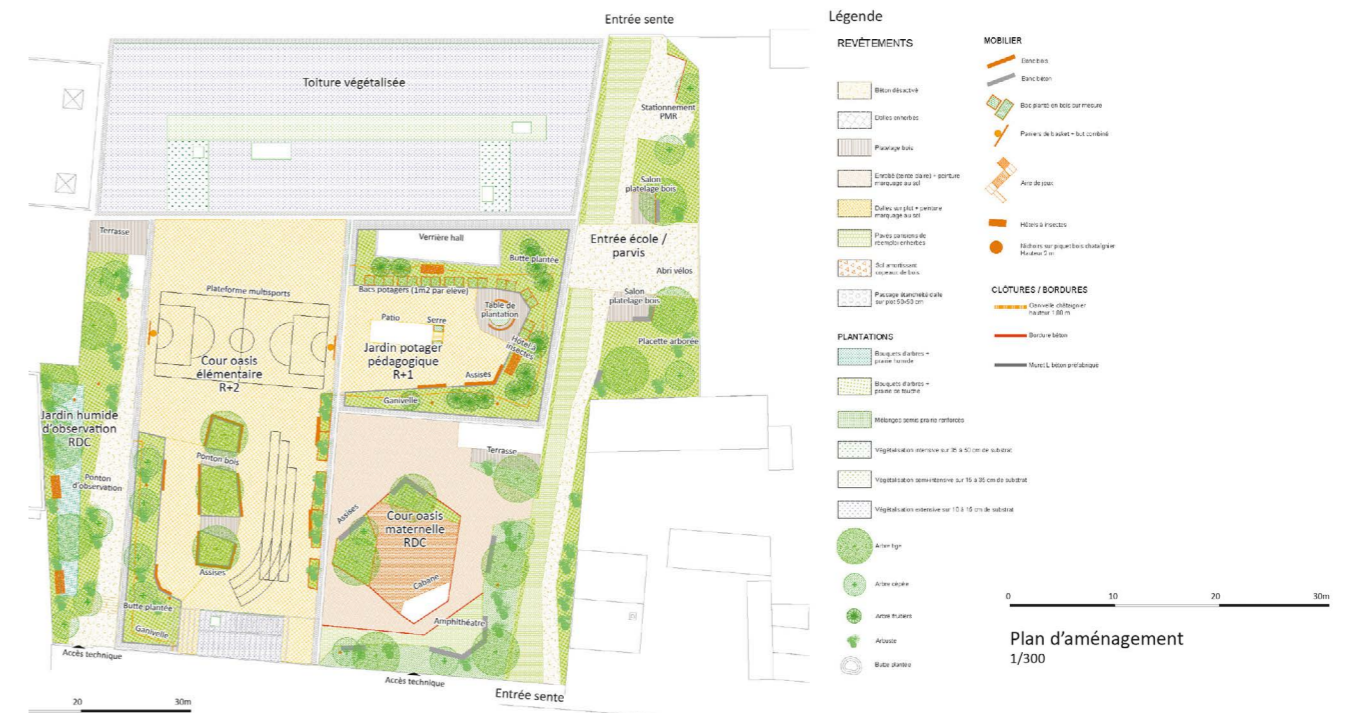
sont créés. Dans la cour élémentaire les îlots sont formés par des buttes et traversés par des pontons en bois. L'alternance choisie des types de feuillages et floraisons offre un aspect ludique pour le développement de la biodiversité auprès des enfants. Les pentes douces (1%) au sol permettent le stockage 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.

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



Plan des espaces végétalisés du groupe scolaire



Focus sur Universeine

Le secteur A, secteur résidentiel sur la commune de 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 présentes 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.

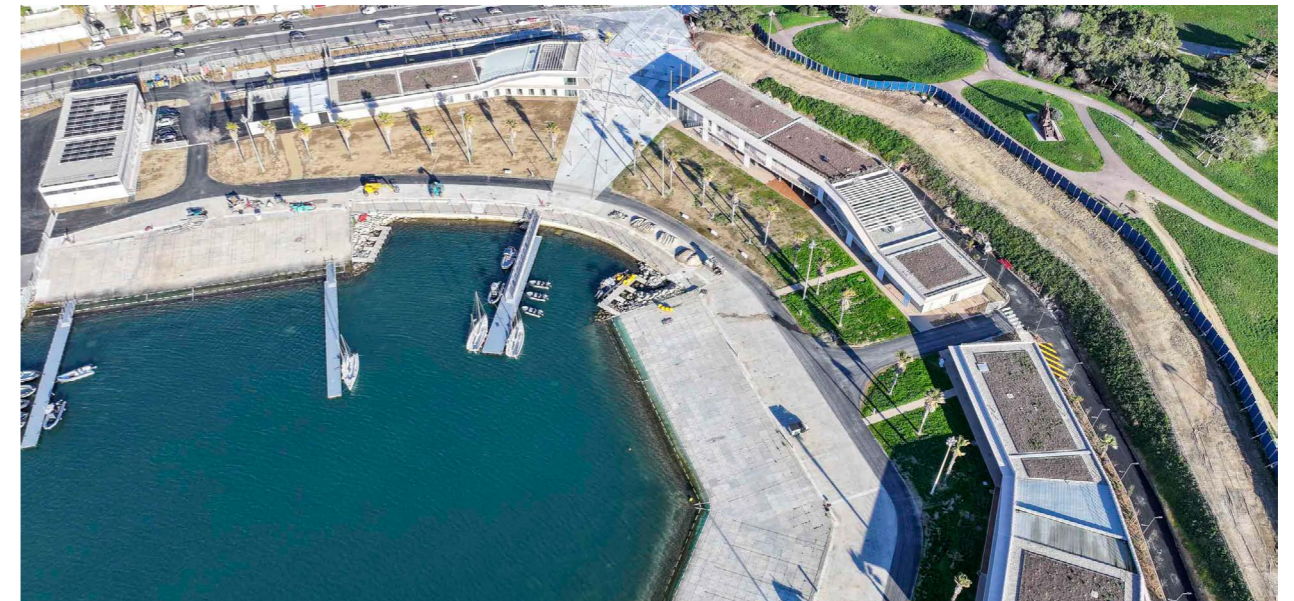
Cette certification a été visée afin d'assurer la prise en compte des enjeux écologiques avec comme objectifs de préserver les espaces verts existants et d'améliorer la potentialité d'accueil de la biodiversité.

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.



Espaces végétalisés de la Marina du Roucas Blanc de Marseille

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 a 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.



Perspective des espaces végétalisés des secteurs Quinconces (à gauche) et Belvédères (à droite) séparés par la promenade Cesària Évora



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 3 000 m² 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 »

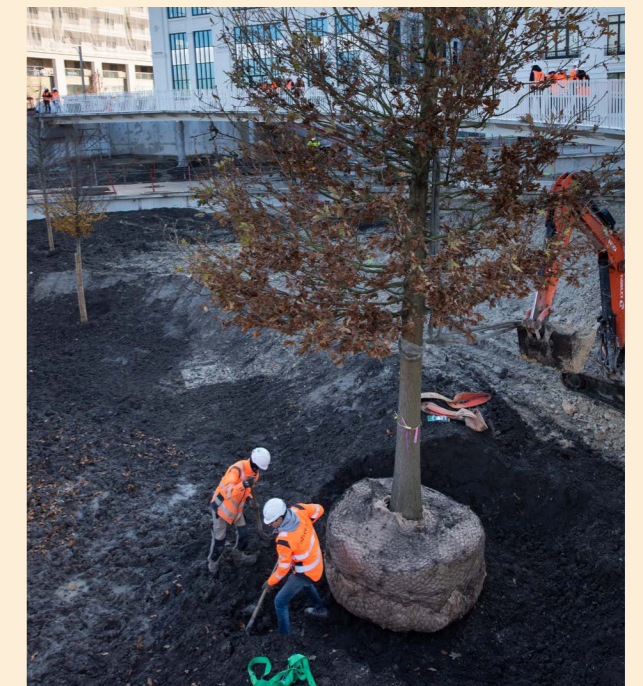
Les résultats obtenus sont aujourd'hui partiels, des travaux sur les espaces verts sont encore prévus en héritage par les promoteurs du Village. Il ressort des premiers retours obtenus des difficultés d'approvisionnement en plantes labellisées « végétal local », notamment liées à la nécessité d'anticiper 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 :

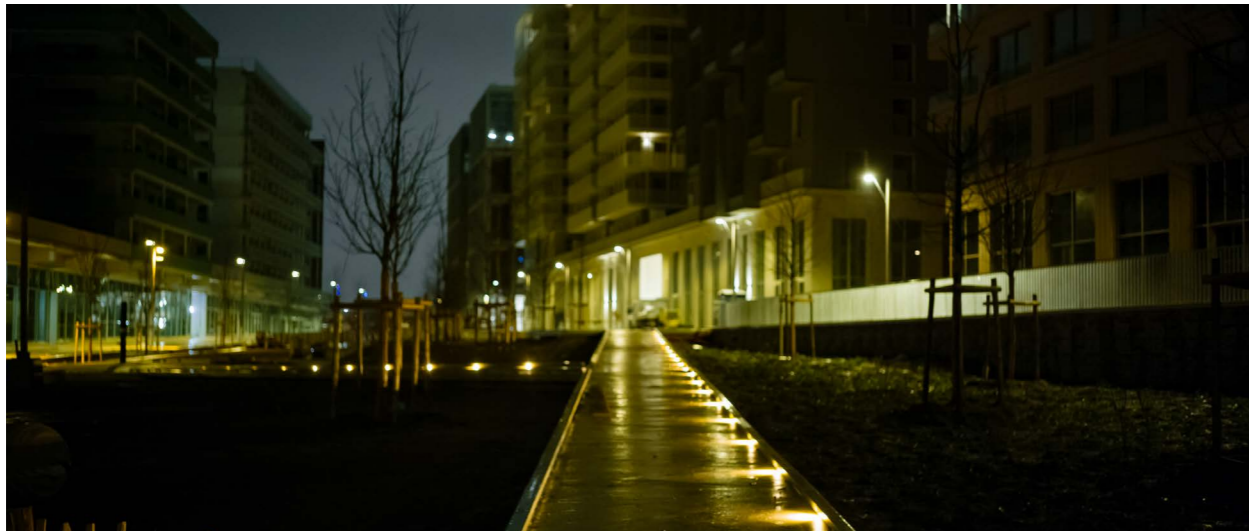
- la restauration de milieux ouverts bénéficiant de fauches différenciées et le maintien de lisières étagées. Les boisements, fourrés arborés et arbustifs (milieux fermés ou semi-ouverts) représentent 77% des espaces de la colline, alors que les milieux ouverts en représentent 23%, avec des prairies 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.



Eclairage nocturne sur la Promenade Cesária Évora

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 abaissements 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 permettant 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'utilisateur.



Principes d'éclairage sur le Village des médias

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 190) 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.

Ainsi, la Ville de Dugny travaille actuellement pour adapter son cahier des charges d'exploitation de l'éclairage public pour y intégrer les exigences du projet. L'expérimentation pourra aussi constituer 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 véritable innovation.

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 écologique répond à cet objectif. Elle consiste à entretenir et aménager les parcs, jardins et espaces végétalisés en respectant l'environnement et les êtres vivants qui y habitent. Son objectif est de minimiser l'impact des activités humaines pour préserver et favoriser la santé des écosystèmes. Contrairement à une gestion classique, qui cherche souvent à « rendre propre » les espaces verts, la gestion écologique privilégie une approche où la nature peut évoluer librement.

Les plans de gestion écologique ont été élaborés pour être le plus simple possible pour être facilement appropriables et applicables par les gestionnaires afin que les habitats soient correctement entretenus. Un contrat d'entretien est en cours 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 Cluster des Médias.



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 Écologie 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 :

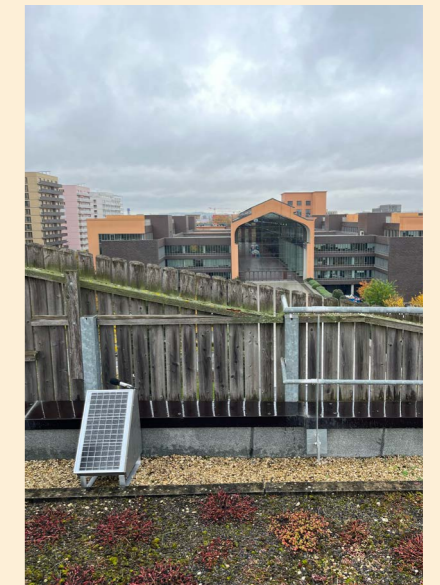
- Le développement d'une plateforme numérique, qui centralise pour les citoyens et gestionnaires le suivi de biodiversité et de la gestion des espaces verts (<https://www.plaine-nature.fr/> et <https://www.1001voisins.fr/>) ;
- le développement d'indicateurs pour le suivi de la biodiversité via les sciences participatives ;
- le suivi en continu de la faune, notamment des chauves-souris et des oiseaux, via les capteurs Leko ;
- le suivi de la fonctionnalité des sols, notamment ceux créés sur les Villages à partir des matériaux issus de la déconstruction (voir page 170) ;
- l'organisation d'animations autour des programmes de sciences participatives auprès des habitants et riverains ;
- la participation des citoyens et gestionnaires à l'adaptation annuelle de la gestion des espaces, en fonction des résultats des suivis écologiques et des besoins des usagers, restitués chaque année 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.

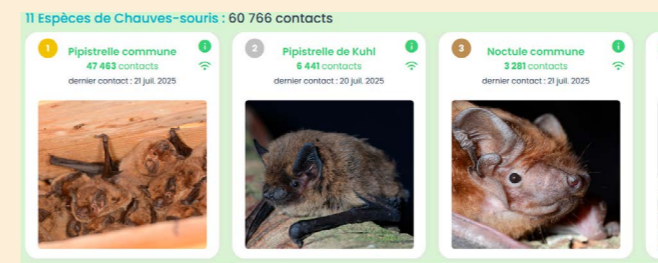
Leko permet d'identifier toutes les espèces de chauves-souris (29 espèces), 42 espèces de sauterelle, 13 espèces d'oiseaux ainsi que 10 autres espèces telles que des papillons et le ver luisant. A la suite d'un processus d'amélioration qui a permis de mettre à jour les capteurs après leur installation, les Leko savent désormais distinguer les cris de certains oiseaux : le Merle noir, la Mésange à longue queue, la Mésange bleue, la Pie Bavarde, le Pouillot véloce, le Rougegorge familier.

Installés dès la phase Jeux, les différents capteurs permettent d'effectuer un suivi des espèces et ainsi d'évaluer l'établissement de la biodiversité dans le temps, jusqu'à fin 2028.

Les projets Plaine Nature et 1001 Voisins ont déjà permis de former de nombreux agents des collectivités à la gestion écologique, de sensibiliser les habitants et riverains aux enjeux de préservation de la biodiversité et de collecter de données de suivi de la faune et flore présente, parmi lesquelles de nombreuses espèces de chauves-souris, d'oiseaux, d'insectes et de fleurs. Ces données sont actuellement analysées par les experts du projet et les résultats seront restitués aux collectivités et habitants, accompagnés de propositions d'amélioration de gestion des espaces et même de l'éclairage public.



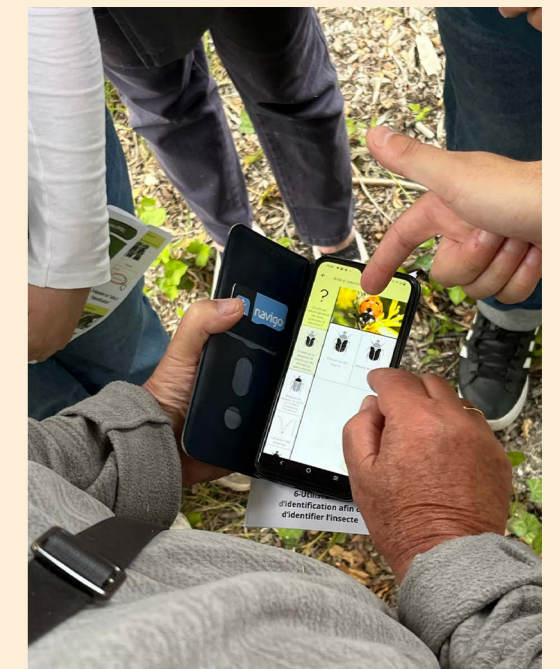
Capteur de biodiversité sur le toit du collège Dora Maar au sein du Village des athlètes



Détections de chauves-souris sur les deux Villages depuis 2024



Détections d'oiseaux sur les deux Villages depuis 2024



Animation de sensibilisation et de collecte participative de données avec des riverains du Village des athlètes

PERSPECTIVES

Le présent document constitue un bilan mis à jour à l'automne 2025 de la mise en œuvre de la stratégie d'excellence environnementale de la SOLIDEO. Il rend compte à la fois des performances atteintes, mais aussi et surtout de la capacité des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des entreprises à concevoir et construire des projets aux ambitions fortes à grande échelle. Au-delà des ouvrages eux-mêmes, l'héritage le plus précieux des Jeux Olympiques et Paralympiques est immatériel : il réside dans la structuration d'une méthode rigoureuse, intégrée et collaborative qui préfigure les standards de la ville durable.

DES AMBITIONS ATTEINTES

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 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.

UNE METHODE REPLICABLE

La réussite de la stratégie d'excellence environnementale de la SOLIDEO ne repose pas sur une simple juxtaposition d'objectifs, mais sur une vision holistique déployée très en amont, déclinée sur chaque opération et contractualisée par un véhicule juridique partagé.

Une vision systémique mobilisant l'intelligence collective

Les différentes thématiques ont été appréhendées de manière systémique, permettant ainsi d'éviter les arbitrages en silo. Par exemple, la conception bioclimatique a permis de répondre simultanément aux enjeux de sobriété énergétique et de confort d'été. De même, la régénération des sols à partir de matériaux de déconstruction (technosols) a servi à la fois la circularité des matériaux et la création d'écosystèmes fonctionnels pour la biodiversité.

Par ailleurs, cette ambition environnementale n'aurait pu être concrétisée sans la constitution d'un écosystème d'expertises internes et externes, piloté par la SOLIDEO. La Direction de la Stratégie et de l'Innovation (DSI) a agi comme un pôle de compétences techniques, accompagnant, avec la Direction des Programmes (DP) en charge de la supervision, chaque maître d'ouvrage dans la déclinaison des objectifs et la résolution des difficultés rencontrées. La SOLIDEO

s'est également appuyée sur des expertises externes cruciales avec des assistances à maîtrise d'ouvrage environnementale, des organismes techniques (CSTB, AQC) et des partenaires de filières (France Bois 2024). Cette organisation a permis de lever avec les équipes des maîtres d'ouvrage des freins réglementaires majeurs, notamment sur la sécurité incendie ou l'accessibilité universelle, créant ainsi une jurisprudence technique précieuse pour l'ensemble du secteur.

Les projets ont démontré qu'il est possible de garantir le confort sous le climat de 2050 sans recourir systématiquement à la climatisation individuelle. La résilience est assurée par la morphologie urbaine, des solutions passives performantes (protections solaires, inertie, ventilation) et un réseau de froid bas-carbone mutualisé, qui constitue une première nationale à cette échelle pour des logements. Cette logique de métabolisme urbain s'étend aux cycles de l'eau et à la création de sols fertiles, transformant le bâti et les espaces publics en supports fonctionnels pour la biodiversité.

Des indicateurs comme outils de pilotage

Le budget carbone, calculé sur l'ensemble du cycle de vie, a été utilisé comme outil de pilotage pour les maîtres d'œuvre. Cet indicateur chiffré et décliné pour chaque ouvrage a été un outil d'aide à la décision précieux ayant permis de considérer le critère environnemental au même titre que les critères calendaires, techniques de mise en œuvre ou encore budgétaires lors des arbitrages de projet.

De même, les seuils d'inconfort sous le climat de 2050 et les objectifs de réemploi ont servi de garde-fous contraignants, orientant au maximum les choix techniques vers des solutions passives et circulaires.

La robustesse de la démarche mise en œuvre repose sur un principe fondamental : l'anticipation et la contractualisation de la collecte de données. Pour qu'un indicateur soit un outil de pilotage efficace, il doit être alimenté par des informations fiables et disponibles tout au long du projet. Ainsi, la SOLIDEO a intégré les exigences de reporting et la fourniture de justificatifs directement dans les documents contractuels des maîtres d'ouvrage et des entreprises. Cette approche a permis de garantir la traçabilité des engagements et de transformer les ambitions en preuves tangibles. Les maîtres d'ouvrage ont ainsi été tenus de fournir non seulement un résultat final mais aussi les données brutes qui le soutiennent via des tableaux de suivi, des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) spécifiques, et des bons de livraison, etc.

La SOLIDEO a fourni des guides et des trames de suivi préétablies pour systématiser la collecte d'informations précises à chaque étape du projet. L'exemple du suivi de la provenance du bois est particulièrement illustratif. Pour vérifier l'atteinte de l'objectif d'un minimum de 30 % de bois français, il ne suffisait pas d'une simple déclaration. Cette rigueur, inscrite dans les obligations contractuelles, a permis de surmonter la complexité d'assurer une traçabilité complète, transformant un objectif environnemental en une réalité logistique et vérifiable. Cette discipline de la donnée est une composante essentielle de l'héritage immatériel laissé par les ouvrages.

En conclusion, au-delà des résultats présentés, ce bilan offre un cadre méthodologique et un retour d'expérience documenté garant d'un héritage répliquable pour tous les acteurs engagés dans la transformation écologique indispensable de nos territoires.

CRÉDITS

Couverture : Agenceengasser & associés - Luc Boegly
Page 8 : Henri Garat
Page 9 : 1616 Prod - Stéphane Vasco
Page 11 : Raphaël Vriet
Pages 16/26/28/30/41/67/73/124/132/167/169/174/176/180/184/186/ 187 : SOLIDEO - SENNSE - DronePress
Pages 21/37/38/40/57/65/84/107/136/141/149/157/163/173/177/185/188 : SOLIDEO - SENNSE - CBadet
Page 42 : Luc Bohro
Page 44 : Silvere Koulouris
Page 44 : Olivier Bureau
Page 44 : SIAE
Page 44 : MGP - Nicolas Grosmond
Page 50 : SOGEPROM
Pages 58/72/78/81/83/99/100/106/118/119/143/145/154/171/175/191 : SOLIDEO
Page 59 : Ville de Paris, Clément Dorval
Pages 60/60/110/111 : Ville de Paris - Guillaume Bontemps
Page 61 : Ville de Paris
Page 87 : Jeanne Frank DR
Page 73 : SOLIDEO-Camille Pinot
Page 97 : Mobius Conseil
Page 115 : VNF Didier Gauducheau
Pages 145/159 : AQC
Page 160 : Snezana Maillot
Page 169 : Conseil Départemental de Seine-Saint-Denis

NOTE AUX LECTEURS

La dénomination des ouvrages dans ce rapport est réalisée conformément à leur appellation en phase jeux.

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