

Les toitures végétalisées : des alliées pour les villes de demain

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Paul BOULLIER - Raphaël PELENC
Caroline DE SA - Clément DESODT

Édité le
25/03/2025

école
normale
supérieure
paris—saclay

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Paul Boullier, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier. La section « 5 - Cas d'application » est entièrement issue du dossier industriel présenté par Raphaël Pelenc lors du concours d'agrégation externe SII, spécialité Ingénierie des Constructions, session 2024.

Les toitures végétalisées appelées scientifiquement PCVH (Paroi Complexe Végétalisée Horizontale) sont des toitures aménagées et recouvertes de végétation qui représentent une alternative à l'emploi de matériaux de recouvrement tels que les tuiles, les ardoises, le bois ou les tôles. Ces toitures ont de nombreux avantages, elles permettent la rétention et l'utilisation des eaux de pluies, elles agissent comme un isolant thermique et acoustique, elles purifient l'air urbain et offrent des espaces verts supplémentaires aux villes. Ainsi dans des villes de plus en plus denses et polluées, les toits verts semblent être une solution à l'amélioration des conditions de vie en zone urbaine.

Ces vertus ont été reconnues tardivement (autour des années 2000) par les villes françaises lors de leur intégration au Plan Local d'Urbanisme. On retrouve pourtant des traces de toitures végétales datant de plusieurs millénaires notamment chez les Amérindiens, en Europe du Nord (figure 2) et au Moyen-Orient avec les célèbres jardins suspendus de Babylone.



Figure 1 : Exemple de toit végétalisé à Paris, source [12]



Figure 2 : Reconstruction de la maison viking d'Erik le Rouge (Xe siècle) près de Narsaq au Groenland, source [13]

Cette ressource après une présentation de la structure d'un toit végétalisé, expose les intérêts acoustiques et thermiques, d'amélioration de la qualité de l'air, de la biodiversité, de diminution du phénomène d'îlot de chaleur urbain et d'émissions de gaz à effet de serre ; enfin elle apporte les connaissances permettant de mieux comprendre les enjeux des toitures végétalisées et les spécificités techniques qui y sont liées, ainsi que les contraintes, coûts et pathologies associées.

1 - La structure d'un toit végétal

Les toitures végétalisées respectent une structure en plusieurs couches (figure 3). En allant de bas en haut, le premier élément est une couche isolante, déjà présente sur les toitures classiques, son épaisseur peut être réduite grâce à l'apport isolant de la PCVH (abordé en section 2.2), couverte de membranes de protection, puis une couche de drainage permet d'évacuer le surplus d'eau si besoin, et enfin le substrat qui sert de ressource pour la végétation.

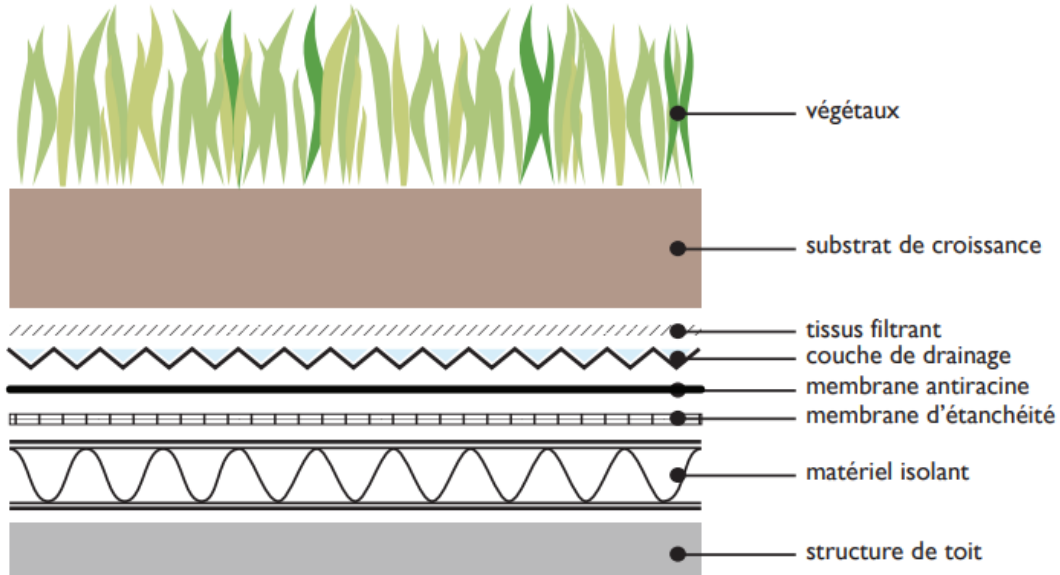


Figure 3 : Structure d'un toit végétalisé, source [3]

Le substrat joue un rôle important au sein d'une toiture végétalisée, son rôle est d'apporter les nutriments nécessaires au développement de la végétation en surface. Pour puiser ces nutriments la végétation développe un réseau de racines jusqu'au drain. Il est important d'adapter le substrat au type de végétation souhaitée, en effet chaque famille de plantes a besoin de ressources différentes et de profondeurs plus ou moins importantes pour ses racines. Trois types de toits végétaux dépendant du type de végétation voulue sont définis : les toits extensifs, semi-intensifs et intensifs. La hauteur et la nature du substrat dépendent des variétés souhaitées (type de granulats, acidité, teneur en eau, teneur en air, matières organiques, etc.).

Type de toiture	Extensive	Semi-Intensive	Intensive
Arrosage	Sans	Périodique	Régulier
Substrat	Léger	Léger	Terre
Épaisseur du complexe	4 à 15 cm	12 à 30 cm	> 30 cm
Charge totale	60 à 180 daN.m ⁻²	150 à 250 daN.m ⁻²	> 600 daN.m ⁻²
Pente maximale	20%	20%	20%
Type de culture	Végétalisation légère, type sédums	Végétalisation légère, type graminées	Végétalisation horticole, arbres

Tableau 1 : Comparaison des trois types de végétalisation des toitures, source [14]

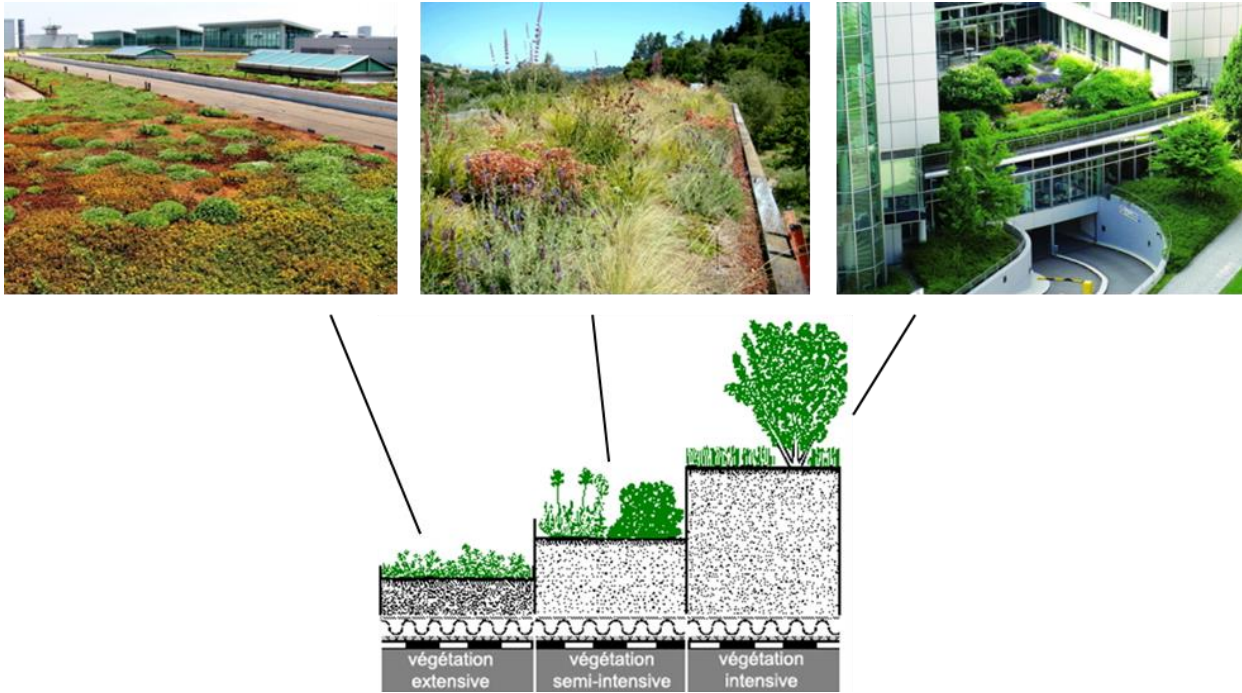


Figure 4 : Exemple des différents types de toit végétalisés, source [15,16]

Chaque toiture a un impact différent sur le bâtiment et son environnement, il est donc important de prendre en compte ces différences dans la suite. L'environnement présente des évolutions de températures et d'humidité relative à l'échelle d'une journée et des saisons (figure 5).

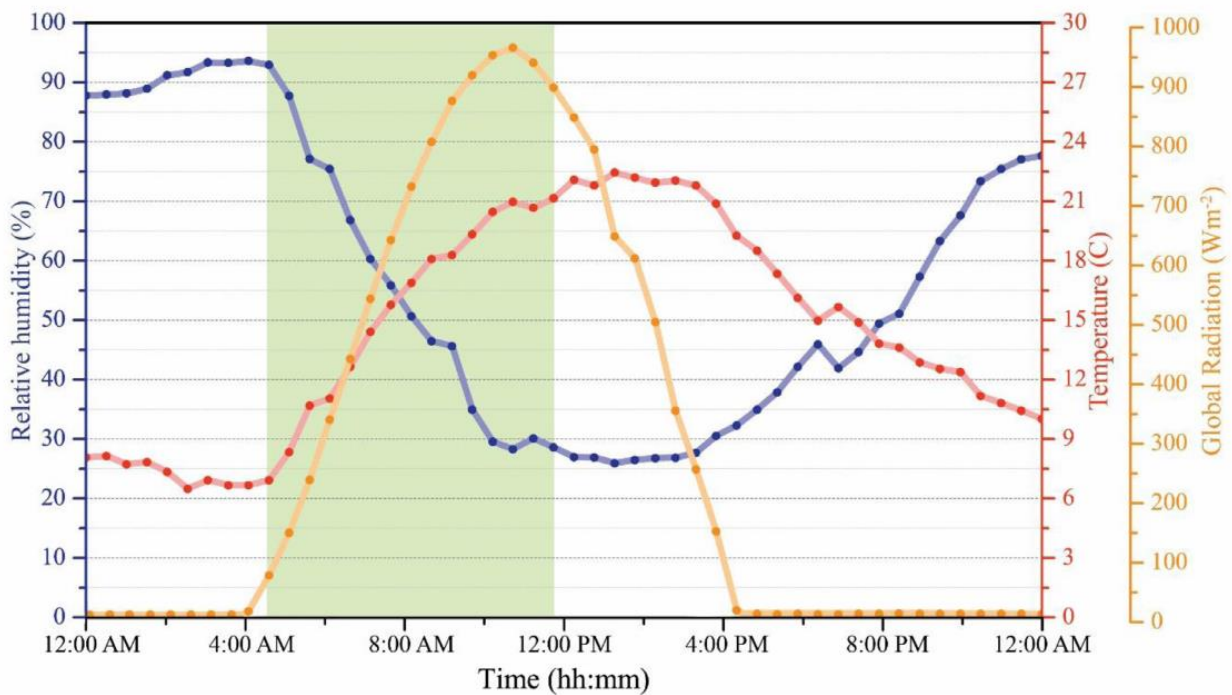


Figure 5 : Exemple de relevés sur 24 heures : humidité relative (courbe bleu), température de l'air (courbe rouge) et rayonnement global (courbe orange), enregistrements des données du 8/4/2017, station météorologique de l'Université de Pérouse, source [20]

2 - Intérêts d'un toit végétalisé pour le bâtiment

2.1 - Rétention des eaux de pluies

Installer une toiture végétalisée peut permettre d'éviter l'utilisation de gouttière ou autre système d'évacuation des eaux pluviales. Le substrat absorbe une partie de l'eau de pluie qui sera ensuite

consommée par la végétation. Lorsque le substrat sature, un système de drainage peut être installé pour évacuer le trop plein d'eau et potentiellement le récupérer en stockage extérieur, ou encore installer des systèmes de stockage en méandres directement sous le substrat (figure 6). La première méthode implique qu'il faudra soi-même arroser la toiture avec l'eau récupérée, ce qui ne sera pas nécessaire pour la seconde méthode. Cependant, stocker l'eau sur le toit crée des charges de toitures supplémentaires de l'ordre de 30 kg/m² dont il faut tenir compte pour la structure (section 4.1). La figure 6 compare la gestion des eaux de pluie par des toitures type terrasse (autoprotégée et avec gravillons à gauche) comparés à des toitures végétalisées pour deux types de méandres (à droite).

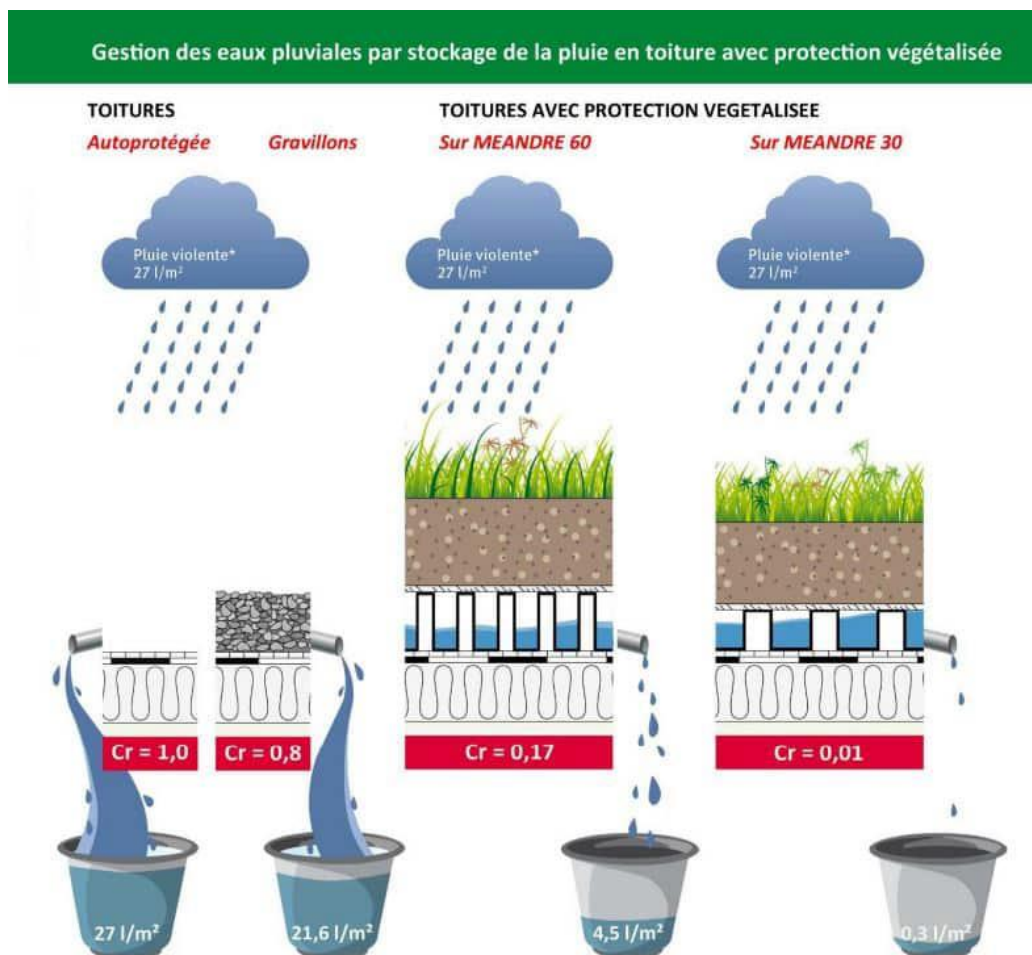


Figure 6 : Gestion des eaux de pluie de différents toits terrasse non végétalisés et végétalisés, source [18]

2.2 - Isolation thermique

2.2.1 - Conduction

Plusieurs facteurs thermiques entrent en jeu lors de l'isolation d'une toiture. Limiter la conduction thermique à travers la toiture est souvent l'objectif principal des isolants pour toiture, la mise en place d'une toiture végétalisée permet aussi de réduire la conduction thermique, sans pour autant pouvoir se priver totalement d'isolant.

Le flux surfacique purement conductif au travers d'un matériaux s'exprime par $\vec{\phi} = \frac{\lambda}{e} \overrightarrow{grad}(T)$ avec λ la conductivité thermique, e l'épaisseur du matériau et T la température.

À partir des valeurs de conductivité thermique classique pour un substrat en terre, le tableau 2 nous permet d'avoir les valeurs de $\frac{\lambda}{e}$ pour plusieurs cas :

Etat du substrat	λ [W/mK]	$\frac{\lambda}{e_{extensif}}$	$\frac{\lambda}{e_{semi-intensif}}$	$\frac{\lambda}{e_{intensif}}$
Substrat sec	0.321	[10.7;2.7]	[2.7;1.07]	< 1.07
Substrat saturé	1.37	[45.7;11.4]	[11.4;4.57]	< 4.57

Tableau 2 : Valeurs de λ/e pour les cas de substrats sec et saturé

Pour donner un ordre de grandeur de conductance classique, on a pour la laine de verre d'une conductivité thermique d'environ 0.04 W/mK avec 10 cm d'épaisseur $\frac{\lambda}{e} = 0.4 \text{ W/Km}^2$, la couche de substrat influe peu sur la conductance sauf dans le cas des toitures intensive. La conductivité thermique du substrat est bien meilleure avec un substrat sec, en effet l'air ($\lambda_{air} \approx 0.024 \text{ W/mK}$) remplacé par de l'eau ($\lambda_{eau} \approx 0.6 \text{ W/mK}$) diminue la conductivité thermique du substrat ; il faut éviter d'avoir un substrat saturé l'hiver pour éviter le gel.

Les toitures végétalisées ne jouent pas le rôle d'un isolant classique, en empêchant la conductivité thermique aux travers de la toiture, mais elles jouent en réalité un autre rôle aux saisons chaudes.

2.2.2 - Rayonnement solaire

En effet les toitures végétalisées sont des isolants très efficaces lors de fortes chaleurs, puisqu'elles empêchent l'absorption du rayonnement solaire par la toiture. Pour un même apport solaire estival, la surface d'une toiture terrasse classique en bitume peut atteindre des températures de plus de 60°C par l'énergie apportée par le rayonnement solaire, alors que la surface d'une toiture végétalisée ne dépassera pas 30°C [9], le feuillage crée de l'ombre sur le toit et lutte donc contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain (section 3.1).

2.3 - Isolation acoustique

Mettre un toit végétalisé améliore l'isolation acoustique de la toiture, les feuillages dispersent les sons hautes fréquences (>3kHz) et le substrat absorbe les sons basses fréquences. D'après les études [5] et [6], la mise en place d'un toit végétalisé de 12 cm peut réduire jusqu'à 40 à 50 décibels (dB) les nuisances sonores, dont des exemples de valeurs sont donnés figure 7. Plus l'épaisseur de substrat et la végétation sont grandes plus l'absorption est élevée. La toiture végétalisée est surtout efficace pour isoler des sons provenant de moteurs comme les avions ou le trafic routier qu'elle peut atténuer presque entièrement selon la distance entre l'émission et l'habitation. De plus les performances acoustiques varient en fonction de l'humidité relative (figure 8).

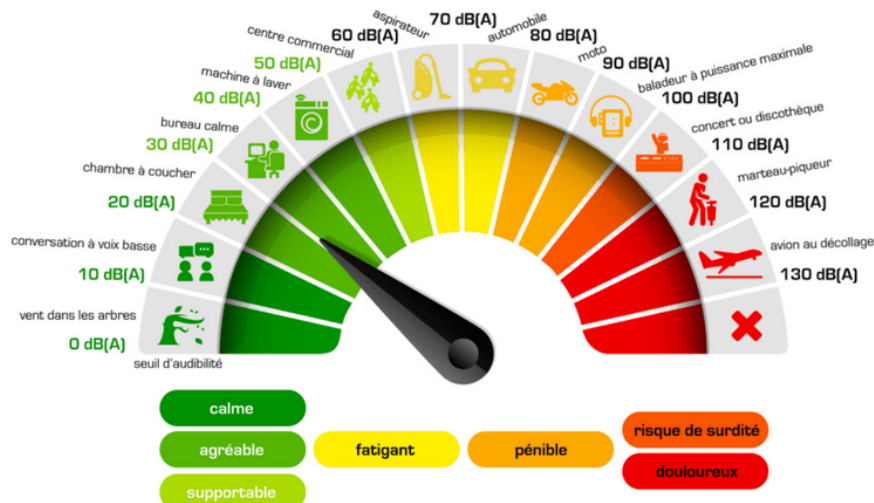


Figure 7 : Exemple de sources d'émissions sonores, source [17]

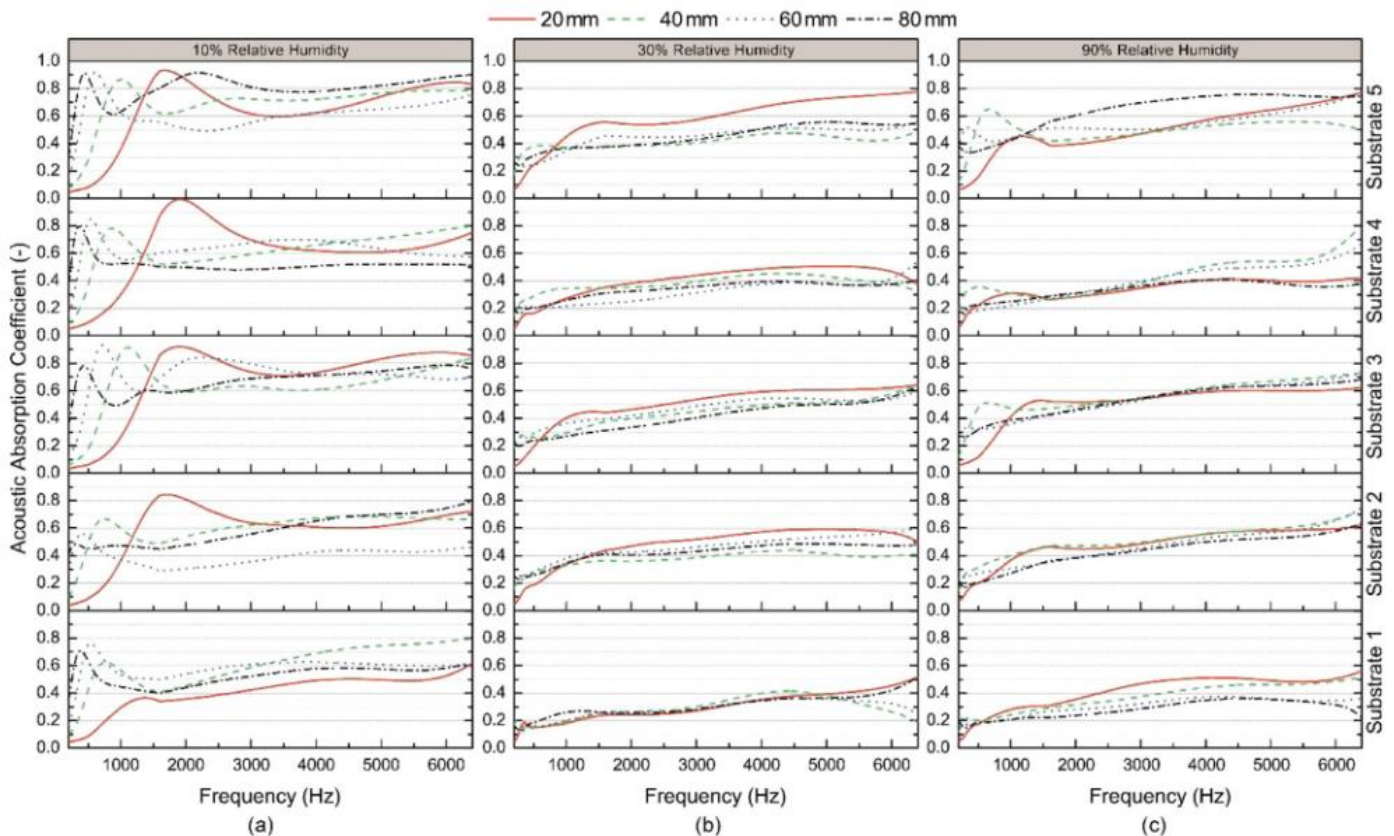


Figure 8 : Variation du coefficient d'absorption acoustique à une température de 21 °C pour 5 variétés de substrats de 4 épaisseurs différentes (20, 40, 60 et 80 mm) en fonction de l'humidité relative de 10% (a), 30% (b) et 90% (c), source [20]

3 - Intérêts en milieu urbain

3.1 - Lutte contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est défini comme l'apparition d'une différence de température entre un centre urbain et son environnement rural. Il peut être mesuré à partir du gradient de température d'air existant la nuit entre les zones rurales et urbaines. Les causes de ce phénomène sont multiples, les principales peuvent être :

- Un faible rafraîchissement de l'air par l'évaporation du fait du fort taux de minéralisation des surfaces et de l'absence de végétation en ville,
- Une diminution du refroidissement des surfaces par convection, conséquence d'un plus faible taux de ventilation des villes : la vitesse du vent est 60% plus importante en zone rurale qu'en ville,
- Une utilisation accrue de revêtements diffusifs (béton, enrobé bitumineux) qui augmentent l'énergie stockée dans les parois au cours d'une journée,
- Une diminution du facteur de vue du ciel et les inter-réflexions qui piègent le rayonnement solaire et limitent le refroidissement par rayonnement infrarouge vers l'atmosphère,
- Des sources de chaleur anthropique liées à la consommation énergétique pour le chauffage, la climatisation, le transport, ...

Ce phénomène d'îlot de chaleur urbain a pour principale conséquence l'augmentation locale des températures de l'air et des surfaces. L'énergie stockée dans les parois pendant la journée est donc plus difficilement restituée la nuit. De plus, le déstockage est moins efficace si les vents sont faibles

comme c'est le cas en ville. La période de restitution est plus longue. Le déstockage de la chaleur ne peut se faire complètement, si bien que l'accumulation lors de plusieurs jours de canicule consécutifs amène à une situation critique.



Figure 9 : Température moyenne en région parisienne sur une journée, source [9]

L'inertie thermique des matériaux, c'est-à-dire leur capacité à accumuler un flux thermique et à le restituer, est une des premières raisons de la formation des îlots de chaleur urbains. Les matériaux de construction ont une inertie thermique plus importante que la terre (la terre sèche a une capacité thermique de $1\,350\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$, le béton d'environ $2\,500\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$). La deuxième spécificité des matériaux contraignant leur comportement face à la chaleur, est l'albédo, qui caractérise la capacité à réfléchir le flux de rayonnement reçu (celui non réfléchi est absorbé) : l'albédo est représenté par une fraction de 0 à 1, où 0 caractérise une surface totalement absorbante sans réflexion aucune, et 1 une surface entièrement réfléchissante. Naturellement, une surface claire est plus réfléchissante qu'une surface sombre, son albédo est donc plus important : l'albédo de la neige fraîche est d'environ 0,8 contre 0,05 pour l'asphalte.

Pour obtenir les différentes valeurs liées à ces phénomènes thermiques on utilise la méthode FASST¹ [10] qui donne les formules suivantes :

➤ **Energie réfléchie :**

$$Q_{reflechie} = \sigma_f I_s \alpha_f + (1 - \sigma_f) I_s \alpha_g$$

- $Q_{reflechie}$: énergie réfléchie
- σ_f : ombrage
- I_s : radiation solaire en W/m^2
- α_f : albédo du feuillage
- α_g : albédo du substrat

L'albédo des végétaux est compris entre 0,25 et 0,30 alors que celui d'un toit en bitume est entre 0,10 et 0,20, donc avec la formule précédente on note que la toiture végétalisée augmente l'énergie réfléchie (qui n'est donc pas absorbée).

➤ **Energie radiative :**

$$Q_{radiation} = \epsilon \sigma T^4$$

- $Q_{radiation}$: énergie radiative

¹ Fast All Season Soil Strength (résistance rapide du sol en toute saison)

- T : température en surface
- ϵ : émissivité de la surface
- $\sigma = 5.669e-08 \text{ W/m}^2\text{K}^4$: constante de Stefan-Boltzmann

La chaleur dégagée par les radiations thermiques est fonction de la température de surface, si on réduit la température de surface de 330 K (60°C) à 310 K (20°C), le facteur T^4 diminue de 22%. On passe par exemple de 55% à 43% de radiations thermiques pour ce cas estival. Un autre moyen de prendre en compte la diminution de température est de multiplier $Q_{radiation}$ par un facteur d'ombrage $(1 - \sigma_f)$. L'énergie latente et sensible est :

➤ **Energie latente et sensible :**

$$Q_{latente+sensible} = \rho_a f C_D^e W l (q_g - q_a) + (e_0 + \rho_a c_{p,a} C_D^e W l) (T_a - T)$$

Avec :

- $e_0 = 2 \text{ W/m}^2$: facteur d'échange sans vent
- $c_{p,a} = 1005 \text{ J/kgK}$: Chaleur spécifique d'air sec à pression constante
- $\rho_a = 1,292 \text{ kg/m}^3$: densité de l'air
- $C_{eD} = 0,002 + 0,006 \times (Z/5000)$: nombre de turbulence avec Z la hauteur de la toiture
- $W = 2,2 \text{ m/s}$: vitesse du vent (valeur classique de 8 km/h)
- $l = l_{evap} = 2,505e^5 \text{ J/kg}$ ou $l = l_{sub} = 2,838e^6 \text{ J/kg}$: chaleur latente de l'eau
- q_a : Saturation de l'air en eau à 2 m
- q_g : Saturation de l'air en eau à la surface
- T_a : température de l'air

Pour la chaleur latente et sensible, l'énergie dégagée provient des changements d'états de l'eau sur la toiture. Les principaux facteurs modifiés par la toiture végétalisée sont la saturation de l'air en eau à la surface et à 2 m ainsi que la différence entre température de l'air et température de toiture. La partie dépendant de la température étant prédominante dans l'équation, la variation d'humidité influe peu face à la variation de température ce qui explique la diminution de l'énergie dégagée par chaleur latente et sensible par une toiture végétalisée.

Au global, on peut voir sur la figure 10 qu'une végétalisation extensive renvoie 63% du rayonnement solaire sous forme de chaleur, soit 23% de moins que le bitume noir (89%). Cela est principalement dû à l'évapotranspiration engendrée par la végétation, qui au contraire de la chaleur latente et des radiations thermiques, ne renvoie pas de chaleur mais rafraîchit l'air.

L'évapotranspiration combine l'évaporation de l'eau directement à partir de la surface et la transpiration, qui est l'évaporation de l'eau à l'intérieur des plantes par les stomates² présents sur leurs feuilles. Lorsque l'énergie solaire atteint les feuilles d'une plante, elle est utilisée pour rompre les liaisons moléculaires de l'eau, la faisant passer de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur d'eau). L'eau évaporée se condense ensuite pour à terme former des nuages, elle a également un effet de refroidissement, car elle absorbe de l'énergie thermique ce qui permet de réduire la température de surface. Ce phénomène est d'autant plus fort que la végétation est développée,

² Ouverture naturelle sur l'épiderme des tiges et des feuilles, assure les échanges gazeux avec le milieu

les toitures semi-intensives et intensives renverront ainsi encore moins de chaleur. Les toitures végétalisées sont donc un moyen de combattre les îlots de chaleurs urbains en apportant de la fraîcheur au centre-ville.

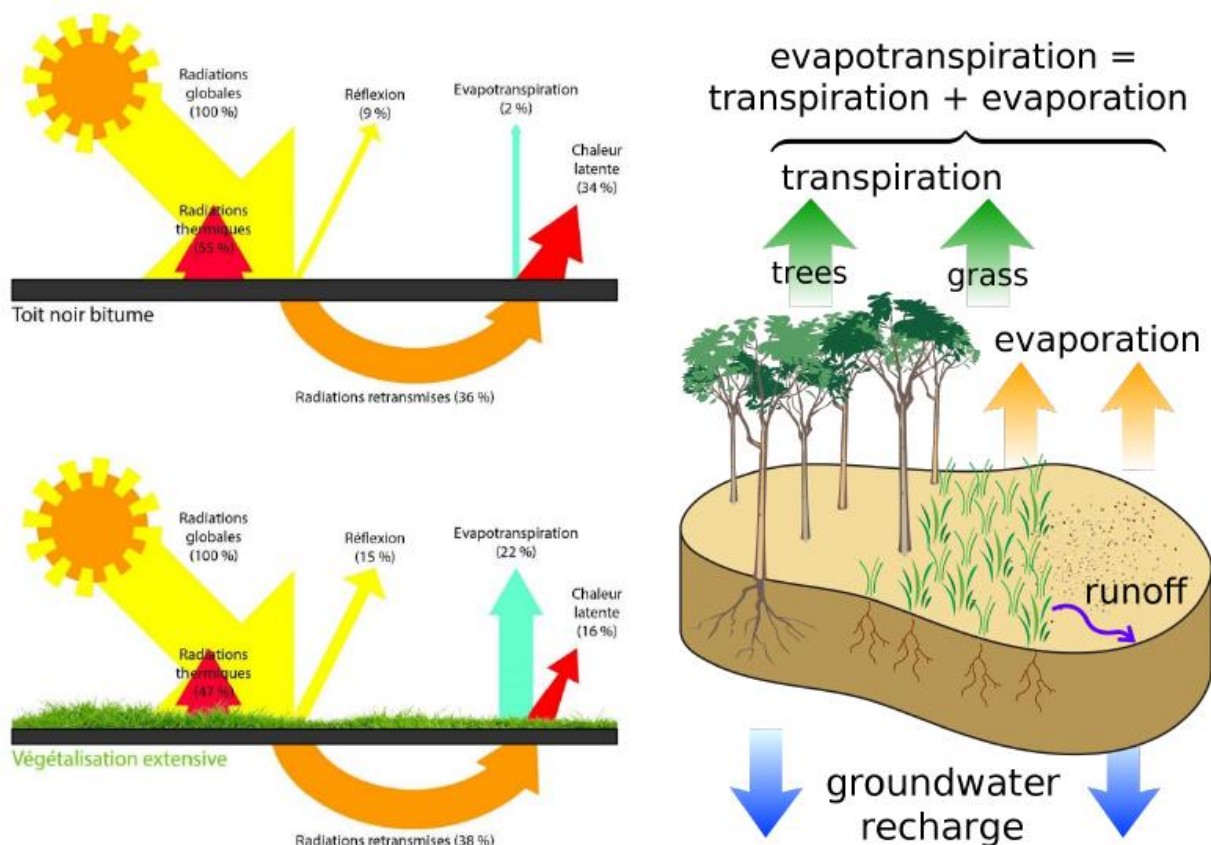


Figure 10 : Schémas de répartition d'énergie entre un toit végétalisé et un toit en bitume noir [9] et schéma du phénomène d'évapotranspiration

3.2 - Émissions de gaz à effet de serre

La végétation a un impact positif sur les émissions de gaz à effet de serre par le phénomène de photosynthèse : elle absorbe du CO₂ pour créer du O₂, on estime une absorption entre 0,2 et 1kg de CO₂/m² à l'année selon la végétation [11]. Les toitures végétalisées luttent donc directement contre les gaz à effets de serre, et de plus, réduisent la consommation d'énergie par leurs propriétés d'isolation thermique (d'environ 30%).

Ainsi l'installation de toits végétaux est une manière de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'un bâtiment. Si l'on compare à l'empreinte carbone d'un habitant en France, estimée à 9,2 tonnes équivalent CO₂ par an en 2022 [21], cela peut sembler dérisoire cependant les toitures végétalisées étant placées le plus souvent en milieu urbain où il est très difficile de réduire le taux de CO₂ dans l'air, leur impact est non négligeable.

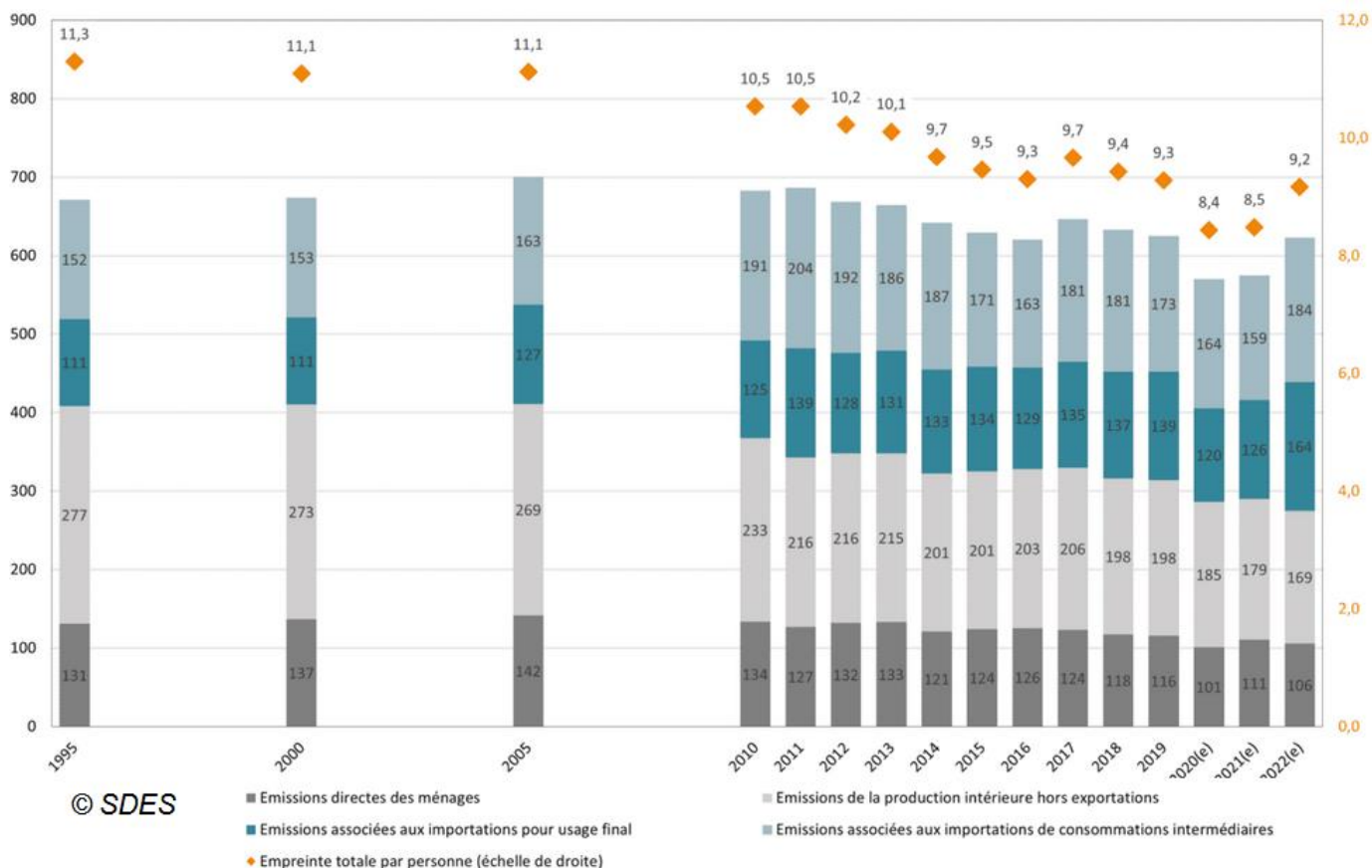


Figure 11 : Empreinte carbone selon des origines d'émissions de 1995 à 2022 [Mt CO₂ eq] (gris foncé : ménages, gris clair : production intérieure, bleu foncé : importation pour usage final, bleu clair : importation pour consommation intermédiaire) - Carrés orange et échelle de droite : empreinte par habitant (la baisse entre 1995 et 2022 n'est que de 7%), source [21]

3.3 - Amélioration de la qualité de l'air

Les végétaux présents sur les PCVH assainissent l'air ambiant en emprisonnant les particules fines aéroportées présentes dans l'air (phytoépuration) [1,4,11]. Les particules fines, telles que des métaux lourds comme les O₃, NO₂, SO₂³ (...) sont émises par les transports, l'industrie (...) et sont nocives. Lorsque les particules se déposent sur les feuillages des végétaux, elles sont transportées par la pluie ou la rosée dans le substrat. Absorbées par les racines, certaines particules peuvent par la suite se retrouver dans les plantes, qui ne doivent pas être consommées.

3.4 - Un atout pour la biodiversité

La mise en place d'une toiture végétalisée crée un nouvel espace de vie pour la faune et la flore [2]. Les végétaux et le substrat présents sur la toiture sont un refuge pour de nombreux animaux et insectes, à la condition que les végétaux soient diversifiés et adaptés à la région dans laquelle se trouve le bâtiment. Des atlas de la faune et de la flore, fournis le plus souvent par le conseil régional, permettent de connaître les espèces adaptées à l'environnement du bâtiment. L'étude Grooves, menée à Paris en 2020, a étudié l'impact environnemental de 32 toitures végétalisées ; les conclusions montrent que de nombreuses espèces frileuses au contact humain apprécient la tranquillité des toitures végétalisées, comme par exemple les abeilles, les punaises, les scarabées et les oiseaux attirés par ces insectes.

^{3 3} O₃ : ozone ; NO₂ : Oxydes d'azote ; SO₂ : Dioxyde de soufre.

3.5 - Un espace vert économique

Les toits végétalisés permettent d'avoir un espace vert privé ou public en milieu urbain, c'est une solution de jardin plus rare en ville par le manque de place et les prix élevés des terrains. Une toiture végétalisée permet de créer des espaces verts sur des parcelles déjà exploitées que sont par exemple un centre commercial, un musée, un bâtiment administratif, etc. Voici quelques exemples de toitures végétalisées en espace urbain :



Figure 12 : En haut à gauche : Centre commercial de Beaugrenelle à Paris ; en haut à droite : Station thermale verte à Aix-les-Bains ; en bas : Jardin botanique à New York, source [19]

4 - Contraintes et coûts

4.1 - Structure

Lorsque l'on envisage de construire une toiture végétalisée, il est important de s'assurer que la structure du bâtiment est capable de supporter son poids. Les ordres de grandeurs pour les différents types avec un substrat saturé en eau sans méandres sont les suivants [1] :

Type de toiture	Classique	Extensif	Semi-extensif	Intensif
Charge [kN/m ²]	0.6	1	2	>6

Tableau 3 : Charge supportée en fonction du type de toiture

On peut donc dans le cas d'un toit végétalisé intensif atteindre plus de 10 fois la charge d'une toiture classique. Cela s'explique principalement par la hauteur de substrat nécessaire à la survie des végétaux, ainsi que par le poids des végétaux dans le cas intensif. Ces valeurs sont à prendre en compte lors du calcul de descente de charge et peuvent engendrer des surcoûts importants.

4.2 - Entretien

Les toitures végétalisées demandent de l'entretien pour que les végétaux prospèrent ; dans la plupart des cas l'entretien peut être réalisé par le particulier (débroussaillage, taille). Le tableau suivant donne la récurrence des entretiens nécessaire en fonction du type de toitures.

Type de toiture	Extensif	Semi-extensif	Intensif
Nombre de fois/an	1 à 2	2 à 4	>4

Tableau 4 : Entretien annuel en fonction du type de toiture

4.3 - Coût

Nous avons vu (partie 1, figure 3) que les protections doivent être ajoutées pour préserver la structure de la toiture, un anti-racinaire et une membrane d'étanchéité protègent l'isolant. Par rapport à une toiture classique, les coûts des dispositifs de protection, du système de drainage, du substrat, de la végétation et de la pose sont à ajouter. On obtient alors l'ordre de grandeurs suivant :

Type de toiture	Classique	Extensif	Semi-extensif	Intensif
Coût [€/m ²]	210	125 à 250	250 à 350	>350

Tableau 5 : Coût en fonction du type de toiture*

*Ces prix ne prennent pas en compte les coûts liés au redimensionnement de la structure dû aux surcharges.

5 - Cas d'application

Ce cas d'application est issu du dossier industriel présenté par Raphaël Pelenc lors du concours d'agrégation externe SII, spécialité Ingénierie des Constructions, session 2024 [22].

Ce dossier propose trois études comparatives sur deux variantes de toiture (végétalisée ou non) de la piscine du Néron à Saint-Égrève (Isère) :

- Structurelle, afin de définir les portiques et en particulier leur complexité due à la végétation ;
- Thermique, afin de définir les besoins annuels en chauffage et le rôle de la toiture végétalisée sur le comportement thermique du bâtiment ;
- Impact sur l'écoulement des eaux et nécessité d'un bassin de rétention.

La structure de la piscine est majoritairement en voile béton supportant une charpente en Bois Lamellé-Collé (BLC)⁴. La structure des façades extérieures de la halle bassins est entièrement en BLC pour permettre l'insertion de grandes baies vitrées couvrant les deux façades extérieures. La piscine est isolée par l'extérieur par une couche de laine de verre puis recouverte d'une membrane d'étanchéité et d'un bardage bois. La totalité du bâtiment présente une toiture végétalisée extensive (voir tableau 1 et figure 4) posée au-dessus de l'isolant reposant sur des bacs aciers fixés sur la charpente en bois.

⁴ Voir ressource « Introduction au matériau bois dans la construction », J. Lépine, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, février 2022, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/introduction-au-materiau-bois-dans-la-construction

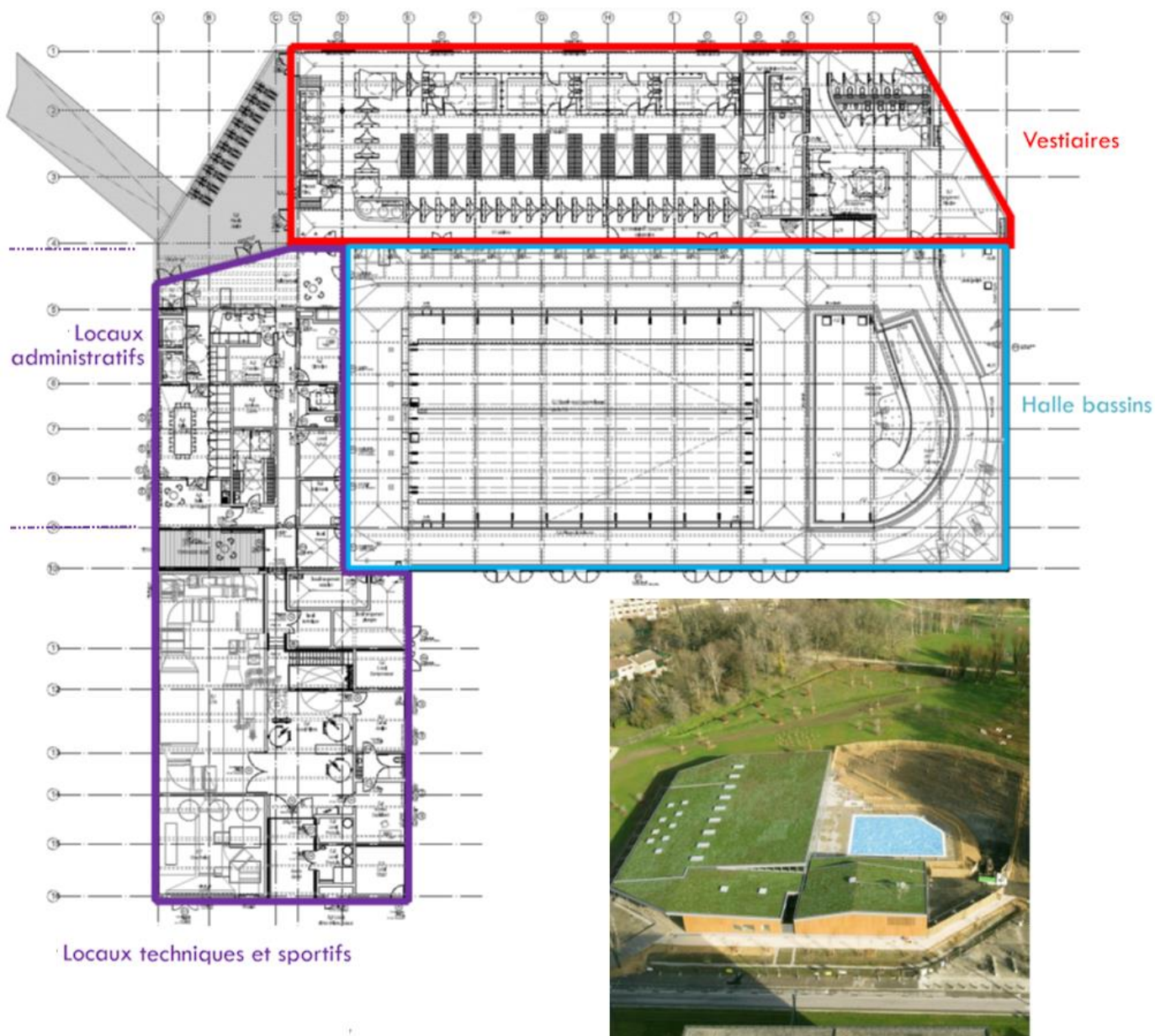


Figure 13 : Plan de la piscine intercommunale du Néron à Saint- Egrève, et vue extérieure sur le toit

La pente de la toiture de la piscine varie de 5%, au-dessus de la halle bassins, à 20% très localement au-dessus d'une partie des locaux techniques. La végétalisation, recouvrant les 2575 m² de toiture, est faite par rouleaux pré-cultivés de 2 cm d'épaisseur étendus sur un substrat de 5 cm d'épaisseur pour un poids maximal à Capacité Maximale en Eau (CME) de 82 kg/m² et une capacité maximale de rétention d'eau de 35 l/m². Le choix d'une toiture végétalisée a été motivé par des considérations esthétiques, la toiture de la piscine étant visible depuis de nombreux bâtiments alentours.

Au-dessus de la halle bassins, la toiture végétalisée apporte une charge permanente plus importante qu'une toiture conventionnelle. Pour couvrir les 25 m de portée au-dessus des bassins et supporter la toiture, une solution structurelle alliant bois et acier a été mise en place, permettant de tirer parti des caractéristiques des deux matériaux associant légèreté du bois et résistante à la traction de l'acier (figure 14).



Figure 14 : Détail des portiques composés de poutres BLC reposant sur des poteaux BLC à droite et voile de béton à gauche

5.1 - Étude structurelle d'un portique de la halle bassins

L'étude est réalisée sur une tranche de charpente de la halle bassins, un portique standard d'une des travées intermédiaires de la halle est présenté figure 15. La portée totale du portique est de 23,5 m. Les portiques principaux de la charpente sont espacés de 4,82 m, des pannes assurent la descente de charge. La poutre sous-tendue est appuyée sur le voile de béton des vestiaires et repose sur un poteau en BLC coté baie vitrée. Le portique étudié comprend à la fois le poteau et la poutre sous-tendue. La poutre en BLC est une double poutre de dimension $2 \times 160 \times 853 \text{ mm}^2$. Le poteau est un poteau de dimension $200 \times 226 \text{ mm}^2$; les bois structuraux sont de classe GL24h⁵, placés en intérieur, on suppose que les bois reste globalement sec (la piscine présente une bonne ventilation). La poutre a une contre-flèche à $L/400$ (5,9 cm). Les tirants en acier S355⁶ et de diamètre 48 mm, sont maintenus à distance de la poutre par des tubes carrés de 80 mm de côté et d'épaisseur 3,6 mm.

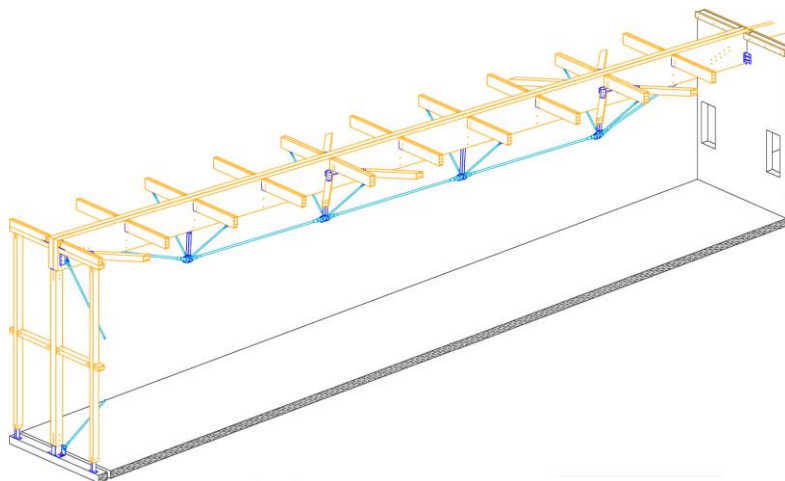


Figure 15 : Portique étudié avec poutre sous-tendue et poteau BLC

Le portique reprend les charges descendant de la toiture (permanente, exploitation, neige et vent), les charges de vent latéral sur la façade vitrée de la piscine ainsi que le chargement thermique dû aux variations de températures saisonnières :

- Poids propre de la double poutre : 123 daN/m

⁵ Classe GL24h correspond à une résistance à la flexion de 24MPa

⁶ Acier S355 est un acier de 355 MPa de limite d'élasticité

- Charges réparties : couverture : 161 daN/m² dont 110 daN/m² pour le complexe de végétalisation
- Charges concentrées, charges d'exploitation de catégorie H⁷ : Q_k=80 daN/m² sur une surface rectangulaire de 10 m² à positionner dans le cas le plus défavorable.
- Neige pour une altitude de 206 m en région C2 : S_k⁸=66 daN/m² et S_{ad}⁹=135 daN/m².
- Vent en toiture : Pression maximale 17,5 daN/m², Dépression maximale -18,0 daN/m².
- Vent sur la façade : Pression maximale 39,9 daN/m², Dépression maximale -29,8 daN/m²

Modélisation avec toit végétalisé

Les charges et la structure peuvent se ramener à un système plan. Selon les plans du Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE), les tirants sont biarticulés, le poteau est articulé en pied sur la dalle et en tête avec la poutre. Cette dernière est également en liaison articulée avec le mur en béton armé. Les charges sont modélisées par des charges uniformément réparties sur l'ensemble de la poutre supérieure sauf pour la charge d'exploitation située sur la portion centrale sur une longueur de 2,07 m de sorte à couvrir les 10 m² (cas le plus défavorable). La valeur de la charge linéique appliquée sur le portique est la charge surfacique multipliée par l'entraxe des portiques (4,82 m).

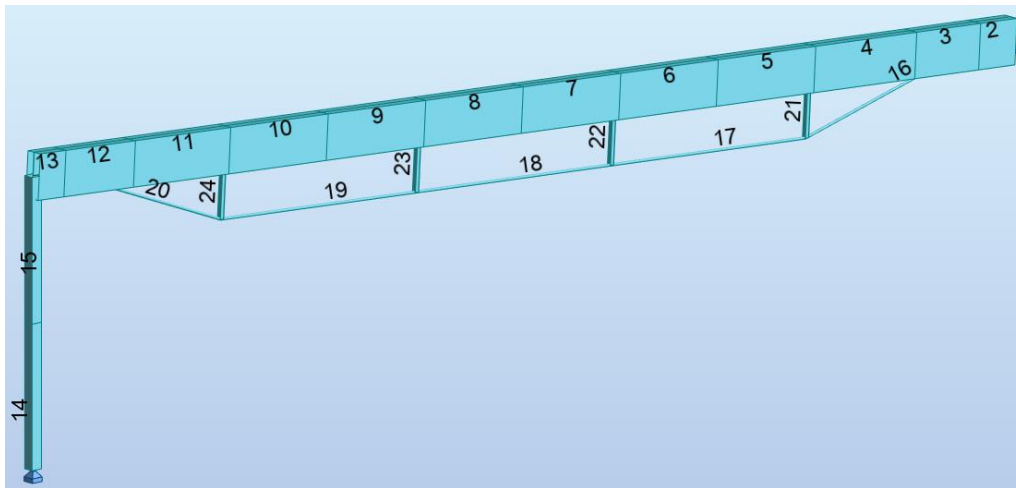


Figure 16 : Modélisation du portique dans le plan sur Robot Structural Analysis (RSA)

Résultats de la simulation avec toit végétalisé

Les résultats présentés figure 17 correspondent au calcul de la combinaison d'actions provoquant les efforts internes les plus importants dans toute la structure (charge variable dominante de neige caractéristique accompagnée d'une charge de vent sur la piscine en dépression interne).

Comme attendu, les tirants en acier sont uniquement en traction, le poteau est uniquement en compression, comme la poutre supérieure. L'intérêt de la poutre sous-tendue se remarque sur le diagramme de moment fléchissant, celui-ci est faible aux points d'attache des barres extrêmes (21 et 24 figure 16). Entre les extrémités de la poutre et ces points d'attache, le moment fléchissant est parabolique mais la valeur maximale atteinte au centre de la parabole est faible.

⁷ Catégorie H : toitures inaccessibles sauf pour entretien et réparations courantes

⁸ S_k : Valeur caractéristique de la neige au sol à une altitude < 20m

⁹ S_{ad} : Valeur de la charge exceptionnelle de neige sur le sol

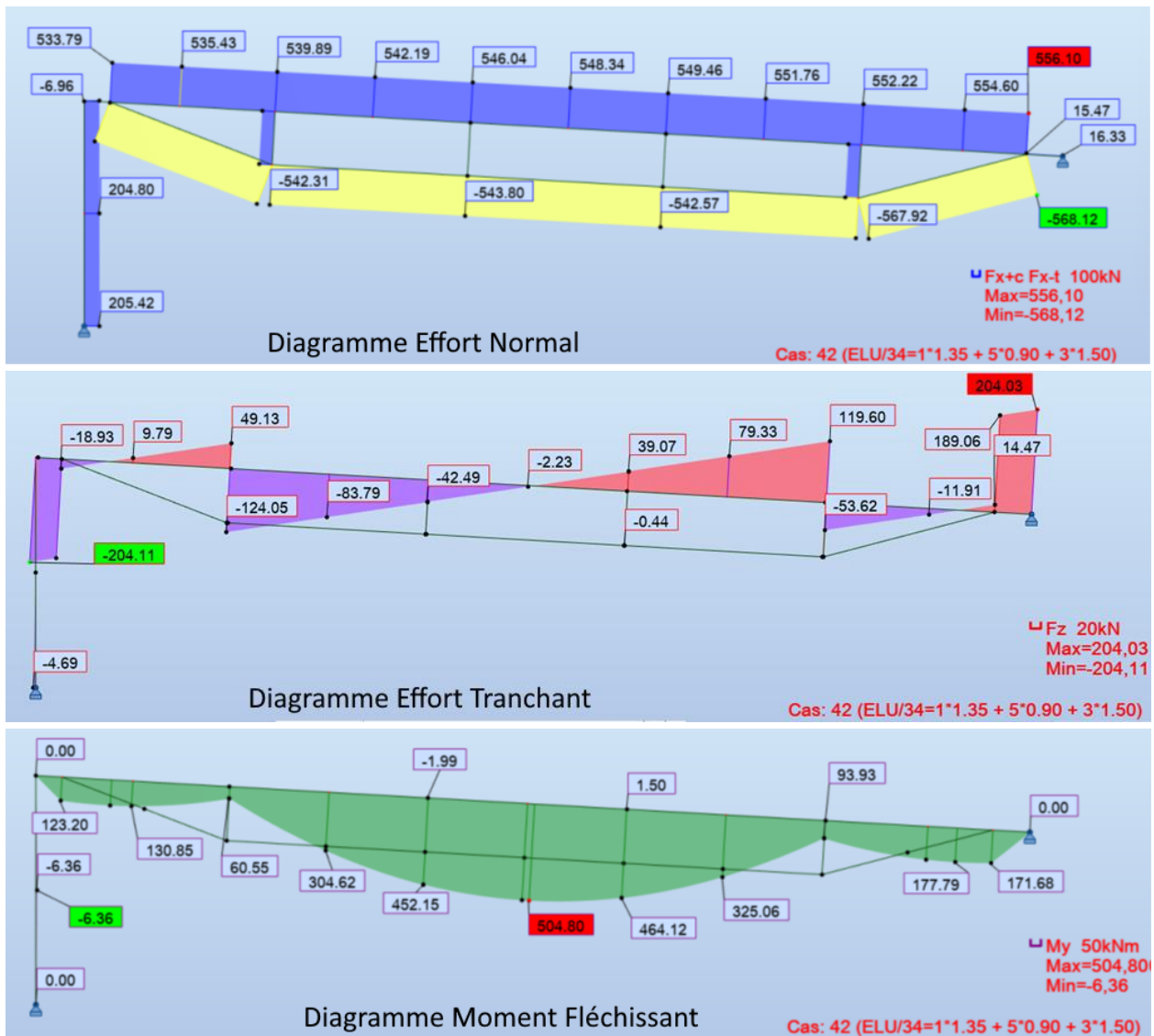


Figure 17 : Diagramme des efforts internes dans le portique avec toit végétalisé sous le chargement ELU

La contrainte normale est plus importante dans les éléments en acier que dans les éléments en bois : les valeurs absolues d'efforts normaux, similaires dans les deux types d'éléments (de l'ordre de 540 kN), s'appliquent sur une section des tirants plus faible que celle de la poutre. La contrainte normale dans les tirants est de l'ordre de 314 MPa. La section de la poutre en bois la plus sollicitée est évidemment située dans les deux barres centrales (7 et 8 figure 16). La flèche maximale sur la poutre supérieure est de 11,4 cm, la limite est fixée à L/125 soit 18,8 cm (figure 18).

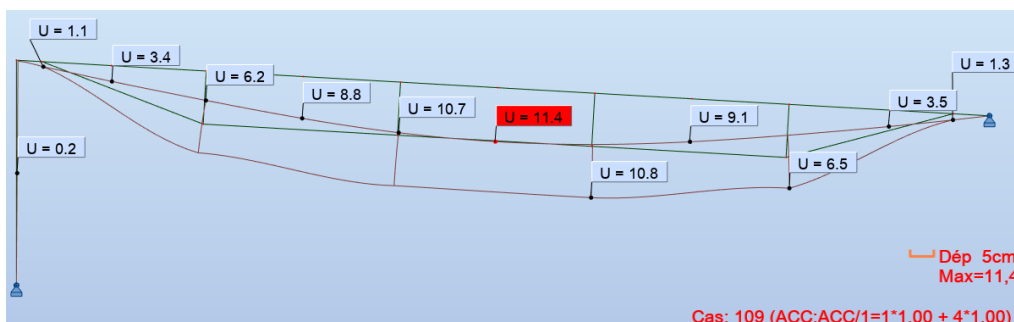


Figure 18 : Déformées et déplacements aux nœuds du portique avec toit végétalisé

Modélisation sans toit végétalisé

Une étude dans les mêmes conditions de chargement de la structure mais sans toiture végétalisée (110 daN/m²) permet de comprendre que la structure serait allégée. La modélisation sans les

tirants de sous-tension de la poutre, reprend les mêmes appuis et articulations que dans le cas précédent (figure 19).

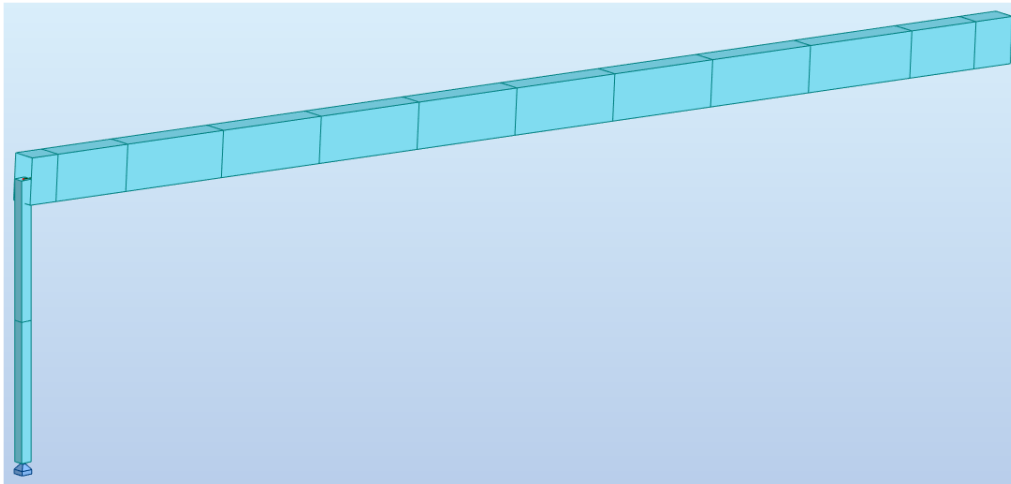


Figure 19 : Modélisation du portique dans le plan sur Robot Structural Analysis (RSA) - cas sans toit végétalisé

Résultats de la simulation sans toit végétalisé

Les efforts internes de la poutre sont conformes à ceux attendus pour une poutre isostatique biarticulée et inclinée (figure 20). La flèche au centre de la poutre est de 12,9 cm (figure 21) pour une limite fixée à L/125 (18,4 cm).

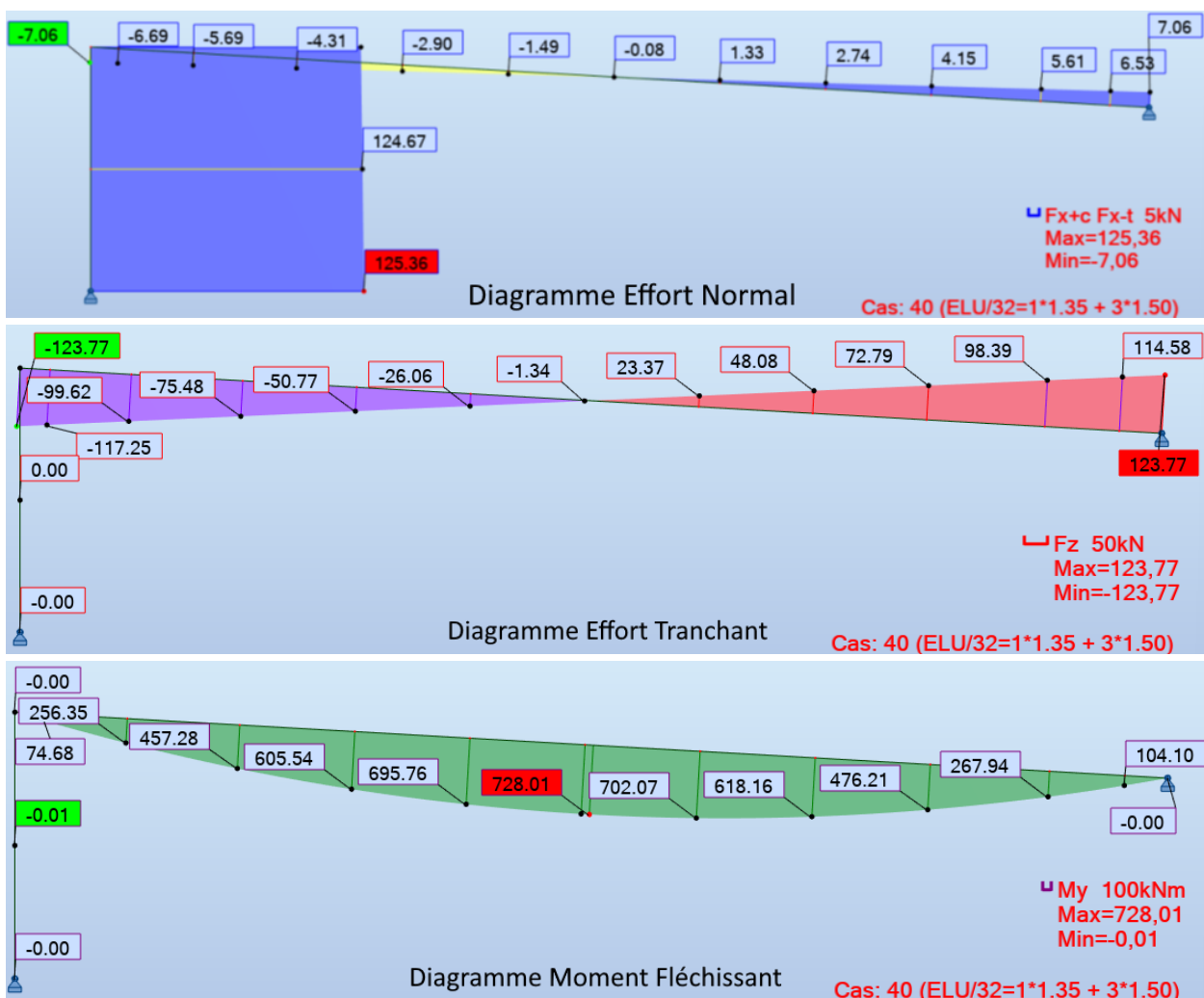


Figure 20 : Diagramme des efforts internes dans le portique sans toit végétalisé sous le chargement étudié

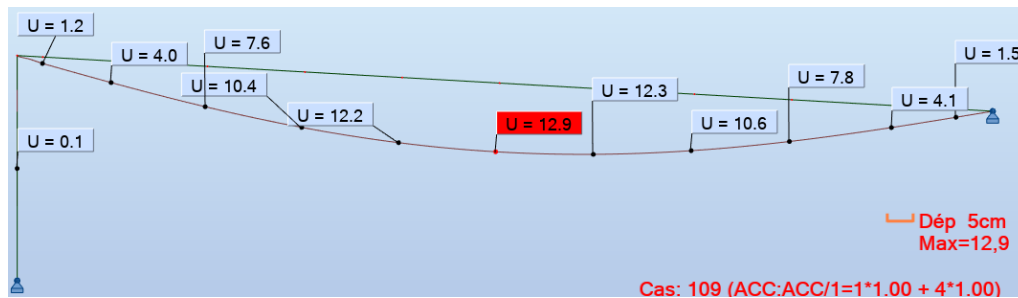


Figure 21 : Déformée et déplacements aux nœuds du portique sans toit végétalisé

Le choix d'une poutre en bois lamellé-collé sous-tendue apparaît comme une solution permettant à la fois de vérifier les critères à l'ELS et à l'ELU en évitant le sur-dimensionnement dans le cas d'une toiture végétalisée. Dans le cas d'une toiture non végétalisée, l'utilisation d'une poutre BLC simple est possible puisque la charge est réduite cependant la poutre en bois aura une plus grande section et donc un plus gros volume de bois, mais elle permet aussi de se passer de l'utilisation d'acier.

5.2 - Étude thermique

L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact de la végétalisation de la toiture sur le comportement thermique du bâtiment. Une modélisation des bâtiments de la piscine a été réalisée dans Pléiades, logiciel de simulations thermiques dynamiques (STD).

Modélisation et caractéristiques

Différentes zones du bâtiment ont été définies, visibles par les couleurs figure 22, correspondant à des zones thermiques indépendantes (les parois intérieures des zones ayant peu d'impact sur la thermique des zones n'ont pas été modélisées) :

- La halle bassins (en rose) correspond à trois pièces communicantes pour affecter un plancher différent à chaque pièce, c'est une même zone thermique ;
- Les vestiaires (en vert) correspondent à une pièce sans cloison ;
- Les locaux administratifs (en bleu) correspondent à une pièce sans cloison ;
- Le couloir de circulation de la zone technique (en turquoise) est une zone non chauffée ;
- Le local CTA (Centrale de Traitement de l'Air), l'atelier, le local pompe et le vide sanitaire autour des bassins (en violet) sont quatre pièces appartenant à la même zone non chauffée ;
- Le local sportif (en jaune) correspond à une zone chauffée par air chaud par la CTA de la zone administrative ;
- Les deux bassins (en orange) correspondent à deux pièces d'une même zone thermique.

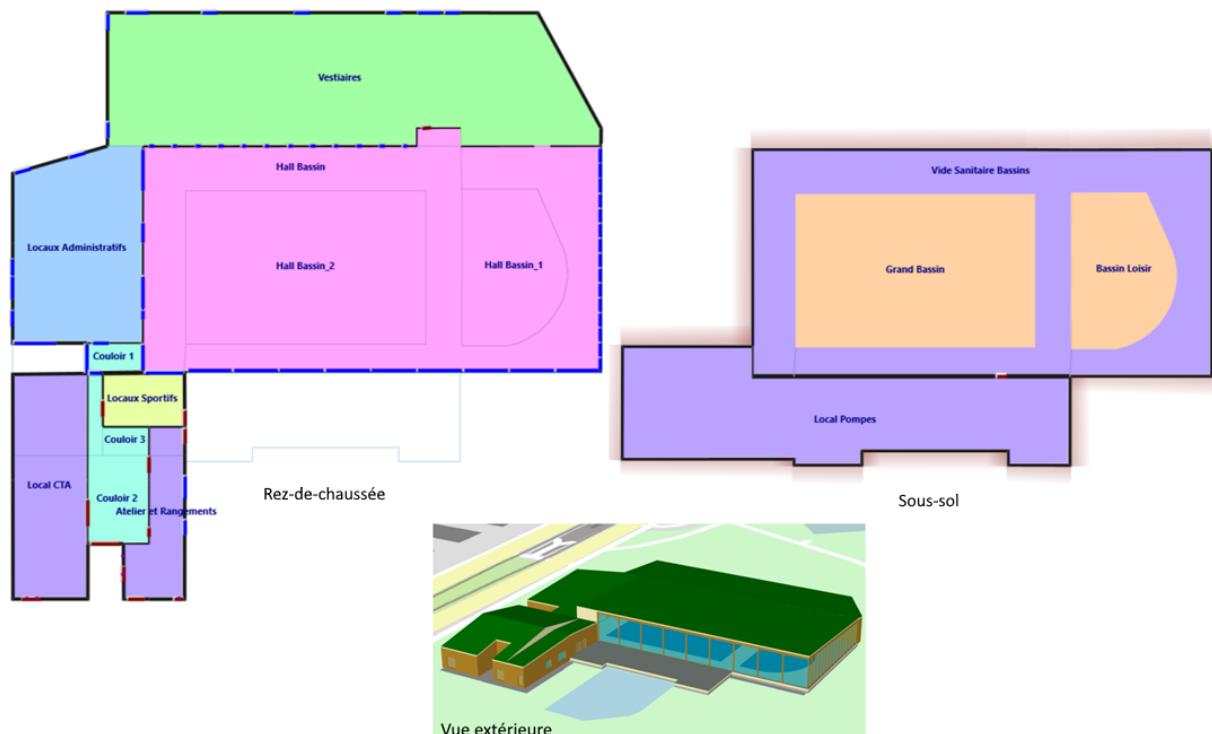


Figure 22 : Répartition des zones thermiques pour la modélisation thermique rez-de-chaussée et sous-sol

La modélisation des murs et leurs caractéristiques sont faites selon leurs fonctions et réalisations :

- Murs extérieurs en béton : isolés par 180 mm de laine de roche recouverts de bardage bois ventilé (pose non jointive) sans impact sur la thermique du bâtiment. L'isolant et le béton armé sont modélisés ;
- Murs extérieurs vide sanitaire : été modélisés avec une isolation intérieure de 12 cm de polystyrène expansé ;
- Murs intérieurs des locaux techniques : simple paroi de béton non isolé ;
- Murs entre la halle bassins et autres zones et murs entre les locaux sportifs et techniques : présence d'un revêtement d'isolation acoustique (panneau de laine de roche de 45 mm) qui agit aussi en isolant thermique ($R=1,1 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$).

Les menuiseries ont également des fonctions et caractéristiques différentes, ainsi :

- Vitrages extérieurs (halle bassins et autre) sont des doubles vitrages argon en châssis mixte aluminium-bois : coefficient U_w de $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$;
- Vitrages intérieurs en simple-vitrage avec cadre en bois : coefficient U_w de $4,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$;
- Portes intérieures en bois : U_w de $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$;
- Portes intérieures métalliques : U_w de $5,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$;
- Portes extérieures isolantes : U_w de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$.

L'ensemble du bâtiment possède la même toiture végétalisée comportant 5 cm de terre sur 20 cm de laine de roche posée sur un bac acier fixé aux pannes. Les planchers sont modélisés en tenant compte des 18 cm de polystyrène expansé positionné en sous-face.

La piscine est située dans un parc avec une exposition normale au vent sur terrain dégagé. La météo utilisée pour la simulation est représentative de la météo de Saint-Égrève sur la décennie 2008-2018. La modélisation de l'interface avec l'environnement se fait par l'intermédiaire du type des contacts :

- Parois extérieures du vide sanitaire (niveau sous-sol) : contact type *sol-terre-plein* visible sur la figure 22 par l'ombre rouge ;

- Parois extérieures avec bardage bois : contact type *lame d'air fortement ventilée* ;
- Toiture : contact de type végétalisation extensive ;
- Vitrage halle bassins : contact de type *extérieur*.

N'ayant pas d'outils spécifiques à la modélisation des bassins dans Pléiades, ceux-ci ont été simulés comme deux pièces (figure 22) à l'inertie thermique spécifique correspondant à celle des bassins remplis d'eau à 27°C. Un plancher en acier fin, donc conducteur, a été modélisé entre le volume de la halle bassins et les pièces-bassins, avec pour objectif de laisser les échanges thermiques se faire sans qu'un échange aéralique puisse être fait entre les pièces. Cette modélisation ne permet pas de représenter l'échange hydrique qui s'opère avec l'évaporation de l'eau des bassins dans l'ambiance de la halle bassins. C'est une forte hypothèse, la piscine échange effectivement de l'eau avec l'air de la piscine mais il était impossible de faire autrement...

Trois zones aéraliques sont modélisées, en accord avec les trois CTA installées : la halle bassins, les vestiaires et les locaux administratifs et sportifs regroupés. Les bouches de soufflage et de reprise installées dans les différentes pièces des zones ont des débits de ventilation conformes avec le CCTP¹⁰ Chauffage-Ventilation-Plomberie-Sanitaire figure 23. Les autres zones thermiques ne sont pas incluses dans des zones aéraliques car elles ne sont pas chauffées.

Zone	Type de ventilation	Equipements	Débit [m3/h]	Gestion
Halle bassins	Double Flux	Caisson de mélange, batterie chaude et récupérateur de chaleur	40900	Suivant occupation et conditions ambiantes.
Vestiaires - Sanitaires	Double Flux	Batterie chaude et récupérateur d'énergie	7850	Suivant occupation
Administrative et Hall d'accueil	Double Flux	Batterie chaude et récupérateur d'énergie	1495	Suivant occupation

Figure 23 : Débit de renouvellement d'air des zones aéraliques (extrait du CCTP Chauffage-Ventilation-Plomberie-Sanitaire)

Le scénario d'occupation correspond à un public de 100 personnes pour la piscine, 20 pour les vestiaires et 5 personnes dans les locaux administratifs. Les consignes de chauffage correspondent aux heures d'ouverture de la piscine :

- Heures accueil public : la température de la halle bassins, des vestiaires et des locaux administratifs est à 21°C, la montée en température se fait 1 heure avant l'ouverture ;
- Coupure midi : la température de la halle bassins et des vestiaires est à 7°C ;
- Nuit : la température de la halle bassins, des vestiaires et des locaux administratifs est à 7°C ;
- Bassins : chauffés en permanence à 27°C.

Variantes de toitures

Afin d'étudier l'impact de la toiture végétalisée sur le comportement global du bâtiment, deux autres types de toitures végétalisées ont été modélisées avec les épaisseurs de 15 cm et 30 cm. Deux autres toitures sans végétalisation ont également été modélisées, elles possèdent la même épaisseur d'isolant et un revêtement gris clair, l'une a la même géométrie que le toit existant, l'autre a deux verrières au niveau de la halle bassins pour un apport de lumière naturelle (figure 24).

¹⁰ Cahier des Clauses Techniques Particulières : document contractuel rédigé par la maîtrise d'œuvre études faisant partie des pièces constitutives du marché public.



Figure 24 : Variante de toiture avec verrières

Résultats des Simulations thermiques dynamiques (STD)

Pour les cinq modélisations, des simulations thermiques dynamiques ont été réalisées sous Pléiades. Les résultats présentés comparent le besoin annuel en chauffage, la puissance de chauffage nécessaire et les températures des différentes zones chauffées pour les cinq variantes étudiées. Ces indicateurs se veulent révélateurs du comportement thermique global de la piscine.

Les besoins de chauffage des quatre zones chauffées sont quasi constants quel que soit le type de toiture choisie (végétalisée ou non et pour les trois épaisseurs différentes de végétalisation) : pour les trois toitures végétalisées (figure 25 : Vege 5cm, Vege 15cm, Vege 30cm), les besoins en chauffage sont identiques au dixième de MWh/an près. La seule variation notable est une hausse de près de 45% du besoin en chauffage de la halle bassins pour la toiture non végétalisée et avec les deux verrières (Toiture Nue-Verriere). On comprend bien qu'en hiver lors de la période au cours de laquelle le chauffage de la piscine est nécessaire, la présence de la verrière diminue de manière très importante l'isolation globale de la toiture ce qui provoque une hausse du besoin de chauffage.

Il est intéressant de noter que pour les quatre cas sans verrière en toiture, le besoin en chauffage des vestiaires est 1,7 fois plus important que celui de la halle bassins alors que son volume est plus de deux fois plus faible ; ce point s'explique par des considérations données par la suite lors de l'analyse de la puissance de chauffage.

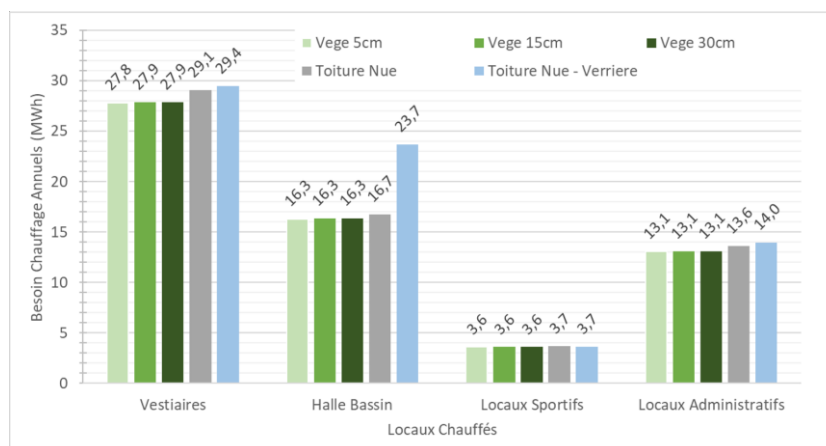


Figure 25 : Besoin en chauffage annuel des quatre zones chauffées de la piscine

Les résultats sur la **puissance de chauffe nécessaire** sont du même ordre que ceux obtenus pour le besoin en chauffage : les puissances obtenues ne sont que très faiblement impactées par les modifications de toiture en dehors des résultats de la halle bassins pour la toiture avec verrière qui présente une puissance 30% supérieure au cas de la toiture avec une végétalisation de 5 cm (figure 26). Mais, contrairement au besoin de chauffage, la halle bassins présente une puissance de chauffage plus de 1,7 fois supérieure à celle des vestiaires. C'est également ce qui est constaté sur

la figure 27 qui détaille les puissances de chauffage des deux zones le long de l'année pour la piscine actuelle à toiture végétalisée d'épaisseur 5 cm.

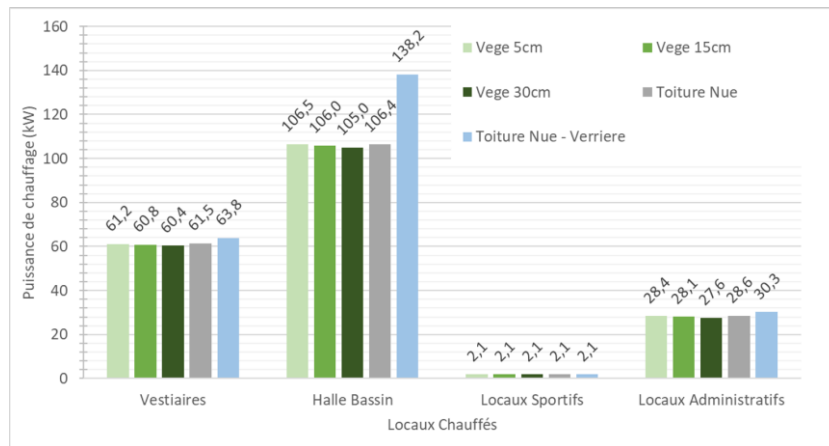


Figure 26 : Puissance de chauffage des quatre zones chauffées de la piscine

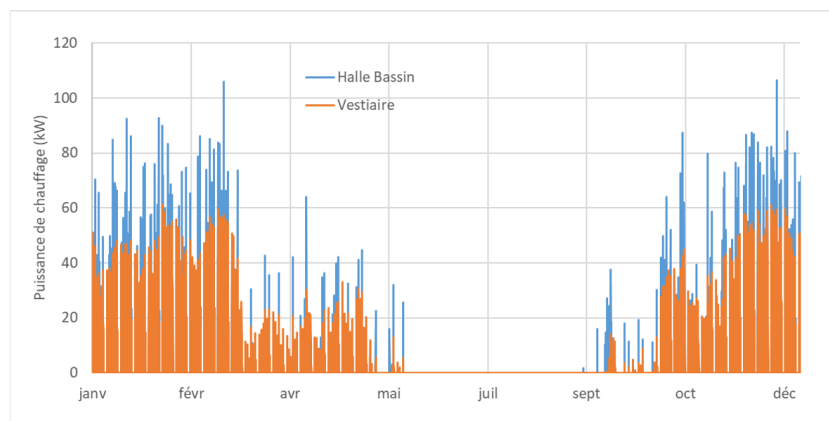


Figure 27 : Puissance de chauffage de la halle bassins et des vestiaires au cours de l'année
Simulation de la piscine actuelle

En regardant sur une semaine type de la période de chauffe (ici fin novembre-début décembre - figure 28), on constate que la puissance de chauffage des vestiaires est plus faible que celle de la halle bassins, mais le chauffage y est réalisé sur un temps plus long quand bien même les consignes de chauffage sont strictement identiques pour les deux espaces. C'est certainement dû à l'inertie plus importante de la halle bassins par rapport aux vestiaires. Si le pic de puissance de chauffage est plus important au démarrage du chauffage pour la piscine, une fois la température de consigne atteinte, la halle bassins subit moins, par sa plus grande inertie, les variations de puissance de chauffage dues aux changements des conditions extérieures.

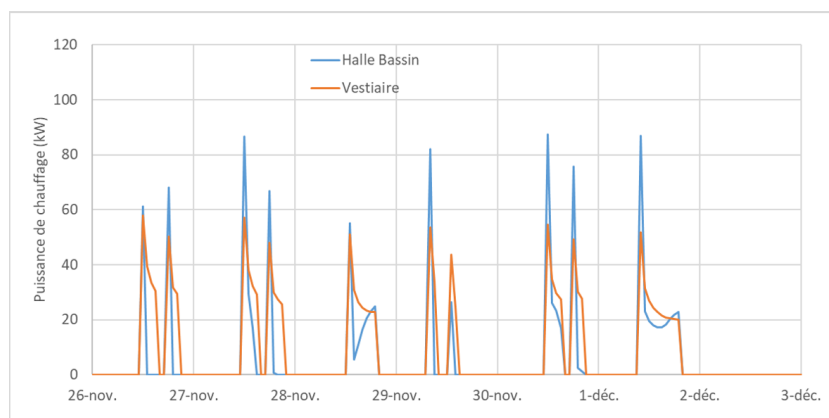


Figure 28 : Puissance de chauffage de la halle bassins et des vestiaires sur la semaine fin novembre-début décembre - Simulation de la piscine actuelle

Seule la **température** la halle bassins est étudiée ici afin de visualiser l'impact des verrières comme on peut le constater figure 29 qui correspond à la première semaine de juillet : la verrière apporte de la lumière mais aussi beaucoup d'apports solaires thermiques ce qui augmente la température intérieure de la halle bassins.

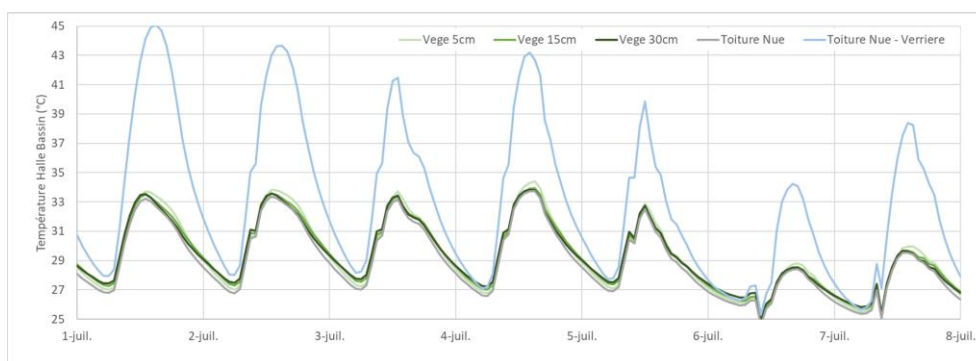


Figure 29 : Températures de la halle bassins sur la première semaine de juillet

L'impact des verrières se retrouve dans les locaux voisins de la halle bassins mais dans une bien moindre mesure. Sur la même semaine, l'écart de température des locaux administratifs entre la simulation avec végétalisation de 5 cm de la toiture et la toiture avec verrières est d'un degré et pour les vestiaires un degré et demi.

En conservant les quatre cas d'études de toitures sans verrières (figure 30), on remarque que les variations de températures semblent légèrement amorties à mesure que l'épaisseur de couche végétalisée augmente. Cet amortissement, bien que très faible par rapport à l'augmentation d'épaisseur de la couche végétalisée (0 cm, 5 cm, 15 cm et 30 cm), est dû à l'augmentation de l'inertie thermique de la toiture. Cette inertie thermique permet de déphaser légèrement l'apport en énergie solaire dans la halle bassins ce qui a pour effet de diminuer la redescente en température la nuit et également le pic de température le jour. Quoiqu'il en soit, ces variations de températures sont de l'ordre de quelques dixièmes de degrés et sont donc négligeables dans l'étude globale du comportement thermique du bâtiment

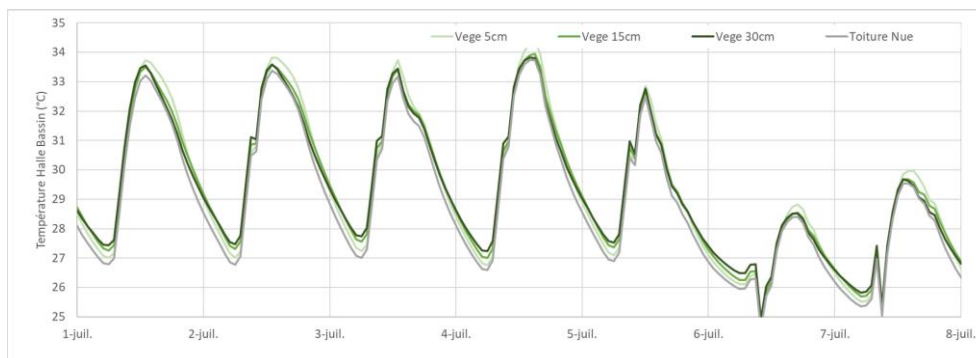


Figure 30 : Températures de la halle bassins sur la première semaine de juillet
Cas des toitures sans verrières

L'étude thermique semble montrer que l'impact des différents types de toitures est assez faible sur le comportement thermique de la piscine. En effet quelle que soit l'épaisseur de végétalisation ou bien même sans végétalisation, les résultats de la STD sont très similaires.

La seule modification de la toiture qui impacte réellement le comportement thermique de la piscine, plus particulièrement de la halle bassins, est la présence des verrières en toiture qui tend à augmenter le besoin en chauffage et la consommation énergétique de la piscine, et donc en diminue la résistance thermique de la toiture. La variante de toiture non végétalisée permettrait de réduire les charges sur la structure de la halle bassins, ce qui aurait pour conséquence de réduire

la complexité de la structure ainsi que la quantité de matériaux nécessaires à sa fabrication, et donc le coût du projet. Cependant une toiture non végétalisée ne retient pas les eaux de pluie et nécessite la construction d'un bassin de rétention (section suivante) dont il faudra tenir compte dans le coût du projet. Il faut également noter que le bassin de rétention artificialise encore un peu plus les sols, que la toiture nue ne se fondera pas dans l'environnement pour le voisinage et que l'intérêt de la végétalisation pour le stockage du CO₂ n'est pas à démontrer¹¹.

5.3 - Étude de la rétention de l'eau

Le ruissellement des eaux de pluies sera différent selon le type de toiture. En effet, l'un des avantages des toitures végétalisées est la capacité de la toiture à retenir l'eau de pluie, et ainsi, à réguler et limiter l'eau évacuée vers la parcelle et éviter de possibles inondations. Cet avantage est d'autant plus intéressant que l'emprise du bâtiment est importante puisque la construction d'un bâtiment artificialise les sols et remplace des surfaces perméables par des surfaces qui le sont moins.

Pour évaluer la capacité de régulation de la toiture végétalisée, un calcul des performances hydriques des toitures a été fait avec l'outil Faveur¹². Ce dernier permet, en renseignant les caractéristiques de la toiture végétalisée et le climat local, d'obtenir le coefficient de ruissellement moyen¹³ et l'abattement moyen¹⁴ de la toiture végétalisée sur une année de simulation ainsi que pour des pluies événementielles (considérées avec une hauteur de pluie supérieure à 5 mm). L'outil fournit aussi les données pour une toiture gravillonnée et pour une toiture nue.

La toiture végétalisée actuelle de la piscine, épaisseur de substrat de 5 cm et le type de végétation sédum, peut retenir 35 l/m² à capacité maximale en eau (ou CME) avec un poids total du complexe de 82 kg/m². Par conséquent, sa capacité maximale en eau en pourcentage est de 42,7%. La simulation se fait sur la base d'un climat méditerranéen ou d'un climat océanique dégradé et le climat le plus proche de celui observé à Saint-Égrève comme le plus défavorable, est le climat océanique dégradé.

La toiture végétalisée a un coefficient de ruissellement près de deux fois plus faible que la toiture nue et un abattement plus important (tableau 6). Une toiture végétalisée permet de réguler l'eau de pluie tombant sur la toiture en la libérant avec un déphasage.

	Coefficient de Ruissellement [-]		Abattement [mm]	
	Annuel	Évènementiel	Annuel	Évènementiel
Toiture végétalisée 5 cm + sédum	0,5	0,5	329	7
Toiture gravillonnée	0,7	0,7	190	2
Toiture nue	0,9	0,9	140	1

Tableau 6 : Coefficients de Ruissellement et Abattement pour les trois types de toiture calculés via l'outil Faveur

¹¹ Un toit végétalisé 6 cm de substrat + sédum absorbe environ 180g de CO₂/m² par an. Source Green roofs as a means of pollution abatement, D. Bradley Rowe, <https://core.ac.uk/download/pdf/144860932.pdf>

¹² Outils Faveur, développé par le Cerema : <https://faveur.cerema.fr/>

¹³ Coefficient de ruissellement (CR) : traduit le rapport entre volume ruisselé et volume précipité sur une surface par une pluie donnée - sans unité, valeur entre 0 et 1

¹⁴ Abattement (Ab) : quantité de pluie retenue par la toiture, exprimée en hauteur de pluie [mm] - Ab = hauteur de pluie - hauteur de ruissellement

Pour aller plus loin dans la démarche, on pourra réaliser le dimensionnement du bassin tampon dans le cas de la toiture nue afin de réguler les eaux de pluies. Il s'agit de calculer le volume nécessaire de ce bassin permettant de stocker le surplus d'eau ruisselant de la toiture et n'étant pas absorbé par le terrain.

6 - Conclusion

Lorsque l'on demande d'imaginer une ville du futur, beaucoup de personnes imaginent des villes plus vertes et plus respectueuses de l'environnement. Aménager des toitures végétalisées sur des bâtiments déjà construits permettrait de répondre à ce besoin tout en conservant le patrimoine architectural des villes. Les toitures végétalisées favorisent la biodiversité, réduisent les émissions de gaz à effet de serre, purifient l'air et isole les habitations durant les périodes chaudes, elles répondent ainsi à une nécessité de construire des villes moins polluées, plus fraîches, plus "vivables".

Références :

[1]: Cabinet Ernst Young, étude pour la définition d'une démarche de développement des toitures végétalisées. Nice, 2009.

[2]: Observatoire Départemental de la Biodiversité Urbaine de la Seine-Saint-Denis, Réaliser des toitures végétalisées favorables à la biodiversité, Seine-Saint-Denis, 2011

[3]: Société québécoise de phytotechnologie, les toits végétalisés, Montréal, 2015

[4]: M. Barra, H. Johan (coord)., écologie des toitures végétalisées. Synthèse de l'étude GROOVES (Green roofs verified ecosystem services). 2021, 92p

[5]: Centre d'études Techniques de l'équipement Méditerranée, Evaluation in-situ de l'efficacité acoustique d'un mur végétal en zone urbaine, Cergy, 2012

[6]: Dunnet N., Kingsbury N., Planting Green Roofs and Living Walls, Timber Press, Oregon, 2004.

[7]: Gendreau N, Rochefeuille P, Kovacs Y., Senechal C.,Lassale F, Les toitures végétalisées, une technique de gestion de l'eau devenue incontournable lors des nouvelles constructions respectant les critères de la Haute Qualité Environnementale, Paris, 2007

[8]: Aurélien Jean, Frédéric Miranville. Toitures végétalisées : Présentation du concept et bénéfices pour l'île de La Réunion. 2011. ffhal-01165874v4f

[9]: Ecologie.gouv, Rapport sur la végétalisation-structure-bois-stage-BCossou.pdf

[10]: Fasst All-season Soil STrength (FASST), Susan Frankenstein and George G. Koenig, September 2004

[11]: Yann Dusza. Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale. Ecologie, Environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017. Français. ffNNT : 2017PA066033ff. fftel-01587757f

[12]: Comment végétaliser un toit ou un mur ? Ville de paris, juin 2022, photo Héloïse Mangin, <https://www.paris.fr/pages/la-vegetalisation-du-bati-21439>

- [13]: les maisons viking, douce cahute, <https://maison-monde.com/maisons-viking/>
- [14]: Règles Th-bat - Ponts thermiques 2017, https://www.rt-batiment.fr/documents/rt2012/thbat/1-Fascicule_generalites.pdf
- [15]: La toiture-terrasse végétalisée, BILP, janvier 2018, <https://toiture.bilp.fr/toiture-terrasse-12/partie-2-les-differents-types-de/vegetalisation>
- [16]: Techniques végétalisation , Agamède, <http://agamede.free.fr/techniqueb2.php>
- [17]: La cartographie du bruit, Caenlamer, <https://caenlamer.fr/cartographie-bruit>
- [18]: Toiture à rétention d'eau, Upgreen, <https://upgreen.be/toitures-vertes/toiture-retention-eau/>
- [19]: Ecovegetal, réalisations, <https://www.ecovegetal.com/realisations/>
- [20]: Thermo-acoustic performance of green roof substrates in dynamic hygrothermal conditions, C. Fabiani, J. Coma, A. L. Pisello, G. Perez, F. Cotana, L. F. Cabeza, Elsevier, 2018,
- [21]: L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2022, Données et études statistiques, Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, octobre 2023, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/empreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2022>
- [22]: Raphaël Pelenc, Dossier Industriel - Piscine Intercommunale du Néron à Saint-Egrève (38120), Concours d'agrégation externe SII, Spécialité Ingénierie des Constructions, Session 2024