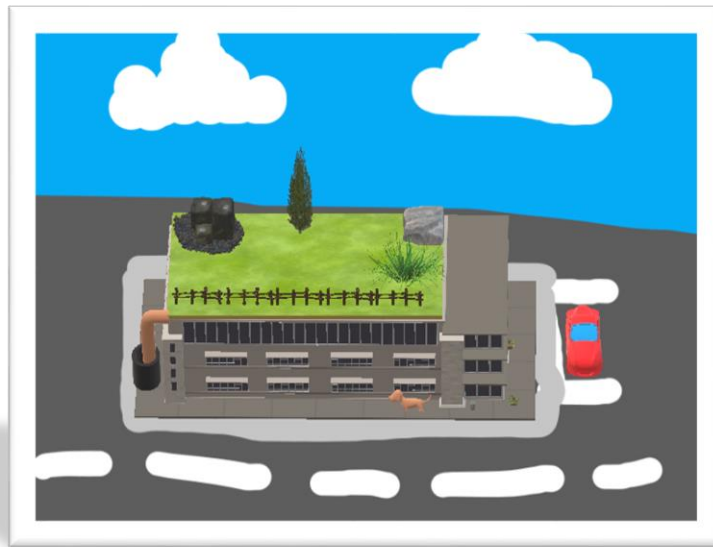


Rapport d'avancement

L'avenir est tourné « vert toit »



Club Scientifique du collège de l'Abbaye

50 390 Saint Sauveur le Vicomte

Réalisé avec l'aide de nos partenaires:

Topager
paysages animés
comestibles et sauvages



l'exigence du
SPÉCIALISTE
au service du
VÉGÉTAL

Tél: 02 33 41 83 37



PRESENTATION DE L'EQUIPE CGENIAL

A la rentrée 2023, un club scientifique a été créé dans notre établissement, le collège de l'Abbaye situé à Saint Sauveur le Vicomte, dans la Manche.

Il est ouvert aux élèves motivés par les sciences et la technologie qui avaient envie de travailler sur un projet commun. Le nombre de places étant limité, nous avons rédigé une lettre de motivation pour pouvoir intégrer ce Club. Nous nous retrouvons le mardi midi et ponctuellement certains mercredis.



Notre équipe est composée de quatorze élèves encadrés par deux enseignants, Mme Ayot, professeur de SVT et Mr Clin, professeur de technologie :

- 11 élèves de 5ème : Jeanne, Armelle, Luce, Noélie, Yuri, Sévane, Axel, Eytan, Marceau, Victoria et Méline.
- 3 élèves de 4ème : Eliott, Mathis et Martin.

Les professeurs nous ont proposé de participer au concours CGénial. Nous avons tous été immédiatement partants. Il fallait alors trouver le sujet de notre projet. Il devait faire appel à la fois à la technologie et aux SVT et nous voulions qu'il traite d'un thème en rapport avec les préoccupations environnementales actuelles.

Parmi plusieurs propositions et idées, nous avons choisi de nous intéresser aux toits végétalisés.

Notre projet s'intitule « **L'avenir est tourné "Vert Toit" ».**

Il s'intéresse aux bienfaits des plantes sur les toits des immeubles en ville.

INTRODUCTION

La France est un pays fortement urbanisé. En 2022, 81,51 % de la population totale vivrait en espace urbain (source Statista 2024)

Chaque année, le pays perd de nombreux hectares d'espaces naturels, agricoles ou forestiers à cause de l'activité humaine. Cette artificialisation du sol a de nombreuses conséquences sur l'environnement :

- Il est un des facteurs de la baisse de la biodiversité.
- Il participe à l'aggravation du réchauffement climatique
- Il amplifie les îlots de chaleur
- Il favorise le phénomène de ruissellement et le risque d'inondation.

Depuis le 1^{er} janvier 2023, la loi « climat et résilience » impose un verdissement des toitures de nouvelles constructions de plus de 500 m². La végétalisation des toits en fait partie. On constate aussi que de plus en plus d'entreprises et de particuliers créent des toits végétalisés sur leurs bâtiments.

Nous nous sommes alors interrogés sur les impacts de ces toits verts et avons défini la problématique suivante :

Comment expliquer l'intérêt écologique de développer les toits végétalisés en milieu urbain?

Pour répondre à cette question, nous allons d'une part rencontrer des professionnels et d'autre part, mener plusieurs études afin de mettre en évidence l'influence des toits végétalisés sur:

- le taux de CO₂ atmosphérique
- les îlots de chaleur
- la rétention des eaux pluviales
- l'isolation des bâtiments
- la biodiversité

ORGANISATION :

Le nombre d'études à mener étant important, nous nous sommes répartis en 3 groupes afin d'être plus efficaces. Nous travaillons dans la même pièce, ce qui nous permet facilement de suivre l'avancée des différents travaux et nous faisons aussi régulièrement « des réunions » afin de partager les résultats, les difficultés rencontrées et de trouver ensemble des solutions.

NOS ETUDES :

1. Les caractéristiques d'une toiture végétalisée

Une toiture végétalisée est un toit sur lequel est installé un écosystème végétal. En commençant ce projet, nous nous sommes posé plusieurs questions notamment sur les différents types de toits verts possibles, leur mise en place et leur entretien ainsi que sur leurs intérêts véritables.

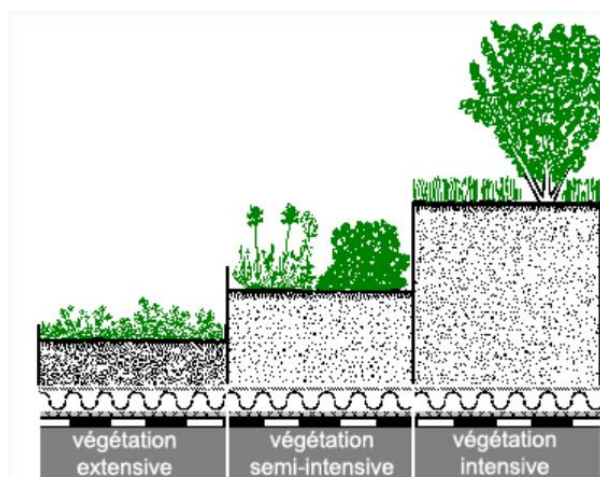
Pour y répondre, nous avons rencontré plusieurs professionnels.

1.1 Rencontre avec un paysagiste de notre région

Nous avons tout d'abord eu une intervention de **Guillaume COAT**, paysagiste et gérant de l'entreprise " Jardins en Cascades " situé à Portbail, dans la Manche. Son entreprise réalise la création de plusieurs toits végétalisés chaque année.

Il nous a renseignés sur la composition et la création de ces structures.

Il y a **3 types** de toits végétalisés : **extensif**, **semi-intensif** et **intensif** selon le type de végétaux utilisés.



Source <http://agamede.free.fr>

Guillaume Coat nous présente le **système extensif** qui correspond à la toiture la plus légère. Il est constitué de caissettes en plastique contenant un géotextile et d'une plaque alvéolée sur lequel est posé le substrat et au-dessus les plantes.



Présentation de l'échantillon du système extensif par G. COAT

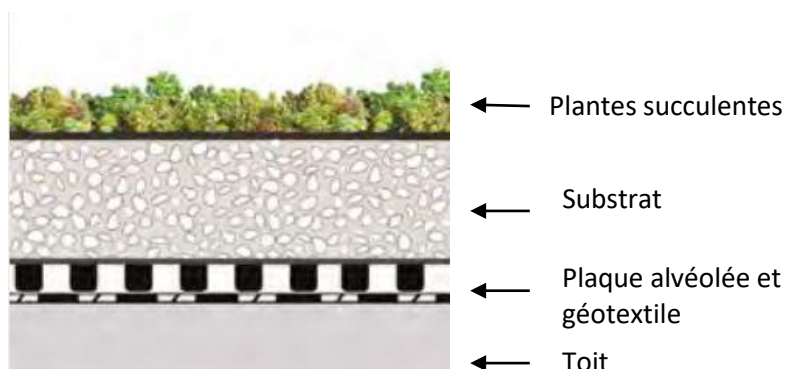


Schéma du système extensif.

Source *Eco végétal, fournisseur de Jardins en cascades*

La plaque alvéolée joue le rôle de drain : en surélevant le système, il évite l'asphyxie possible des racines due à un excès d'eau et il permet aussi de stocker de l'eau pour les végétaux.

Le substrat est composé de billes d'argile, de roches volcaniques, de compost et de terre végétale et a environ 7 cm d'épaisseur.

Les plantes (dans ce système) sont des succulentes comme les **Sedum**. Riches en eau, elles sont résistantes à la sécheresse. En 6 à 8 mois, les caissettes seront entièrement recouvertes par ces végétaux.

Différences et points communs entre les différents systèmes :

Quel que soit le choix du système de toit végétalisé, le substrat est le même. Ce qui change, c'est son épaisseur. Aucune plante n'est interdite sauf celles possédant des rhizomes traçants comme les bambous. Concernant l'entretien, un système extensif ne nécessite au maximum que 2 interventions par an pour regarnir si besoin et éliminer des plantes « étrangères ». Pour le semi-intensif et l'intensif, un entretien comme pour un jardin classique est nécessaire ainsi qu'un système d'arrosage.

Pour créer une toiture végétalisée, il faut que le toit soit étanche à l'eau et aux racines et connaître ses contraintes c'est-à-dire le poids qu'il pourra supporter.

Un toit vert a plusieurs intérêts : il retient l'eau comme une éponge, ce qui limite le risque d'inondation et il joue aussi un rôle d'isolant thermique.

Pour conclure son intervention, Guillaume Coat nous précise que dans notre région, les toits végétalisés ne sont pas encore très développés et concernent essentiellement les collectivités pour montrer l'exemple et les entreprises qui ont une obligation d'avoir un minimum de surface avec des végétaux.

Afin de compléter ces informations et de mieux comprendre l'importance de créer des toits verts en ville, nous avons contacté une entreprise située à Paris.

1.2 Rencontre avec TOPAGER, une entreprise parisienne.

L'entreprise **TOPAGER**¹, située à Paris, a répondu favorablement à la demande de nos professeurs pour nous aider dans ce projet.

TOPAGER existe depuis 10 ans et compte aujourd'hui 24 salariés. Elle possède un pôle conception (étude de faisabilité, réalisation de plans, ...), un pôle réalisation et un pôle suivi. Cette entreprise a ainsi réalisé la végétalisation de nombreux bâtiments dont l'Opéra Bastille.

C'est Mathilde, maraîchère et chargée de développement qui a répondu à nos questions lors d'une visioconférence. Elle nous a d'abord expliqué que la création de toits verts est un phénomène en pleine croissance et que cela va se poursuivre car la loi « Climat et résilience » a été mise en place.

¹ <https://topager.com/>



Visioconférence avec Mathilde de l'entreprise TOPAGER

Elle nous présente ensuite les 3 grands types de toits qu'ils réalisent :

- **Potager** : pour une production alimentaire. Son rendement est le même qu'un potager dans un jardin.
- **Toiture de biodiversité** : mise en place uniquement de végétaux sans accès au public. Objectif : amener de la biodiversité (oiseaux, insectes).
- **Lieu d'accueil du public** : le 1^{er} critère est esthétique. Il peut être aussi pédagogique.



Une toiture de biodiversité à Nanterre
Topager.com

● Toitures sauvages du projet GTM



Un potager sur le toit de l'Opéra Bastille
Topager.com



Un Lieu d'accueil sur les toits à Paris
Topager.com

Pour déterminer le type de végétalisation à installer, il faut déterminer en premier, la portance du toit. Selon elle, la quantité de terre à mettre et donc le type de végétaux ne seront pas les mêmes. Ensuite, il faut savoir si la toiture est destinée à accueillir des gens ou pas. Elle nous précise qu'un permis de construire n'est pas nécessaire s'il n'y a pas de changement d'allure ou si les végétaux ne sont pas visibles de l'extérieur.

Nous nous interrogeons sur l'**entretien** de ces toits qui sont de type semi-intensifs et intensifs.

Mathilde nous a expliqué qu'une surveillance biologique des plantes était nécessaire car il n'y a pas d'apport de produits chimiques donc il faut être très vigilant. Un arrosage régulier par tuyaux de goutte à goutte est indispensable l'été. Nous avons été surpris d'apprendre que c'est de l'eau du robinet qui était utilisée pour cela. En effet, le stockage d'eau de pluie dans des récupérateurs n'est pas possible à cause des problèmes de portance mais des projets d'intégrer un réseau d'eau non potable sont en cours pour la réalisation des toits végétalisés des nouveaux bâtiments.

A notre question sur l'intérêt des toits végétalisés en milieu urbain, Mathilde nous a dit qu'ils rendaient des **services écosystémiques** à la ville :

- Diminuer des îlots de chaleur
- Améliorer de l'absorption des eaux de pluie
- Isoler les bâtiments
- Créer d'une biodiversité qui n'existe pas dans un milieu totalement artificialisé
- Faire une production agricole
- Faire une pédagogie écologique

Pour finir, elle nous a parlé du nouveau type de toits qui commence à se développer, **le biosolaire** qui rassemble panneaux solaires et végétaux. La difficulté est de trouver des végétaux qui peuvent se développer à l'ombre des panneaux solaires.

Ces interventions nous ont permis de mieux comprendre les spécificités des différents types de toits végétalisés et de confirmer le choix des études que nous voulions mener pour montrer les impacts écologiques de ces systèmes.

2. Impact des toits végétalisés sur le réchauffement climatique

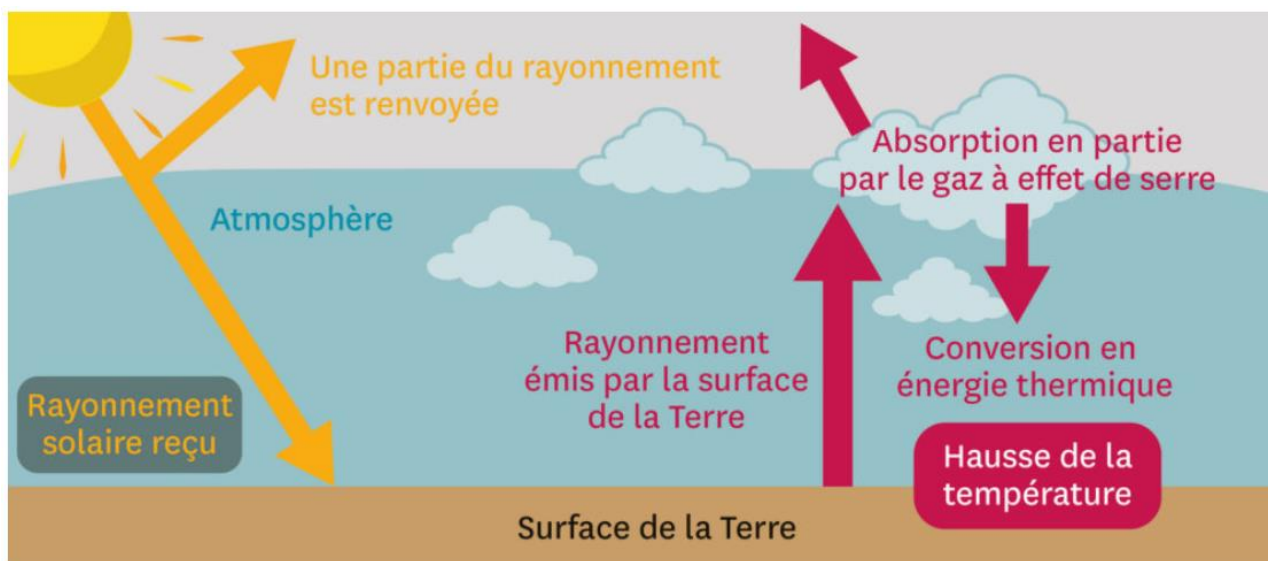
En cours, nous avons étudié le réchauffement climatique et ses conséquences dramatiques pour la planète. Face à ce problème, les gouvernements ont décidé de mettre en place des solutions concrètes pour réduire les émissions de gaz à effets de serre. La France, par la loi Climat et Résilience, favorise la mise en place de toitures végétalisées.

Comment ces toits verts peuvent avoir un impact sur le réchauffement climatique ?

2.1 Le réchauffement climatique, c'est quoi ?

Pour le comprendre ce qu'est le réchauffement climatique, il faut d'abord comprendre ce qu'est l'effet de serre.

L'**effet de serre** est un **phénomène naturel** par lequel les gaz naturellement présents dans l'atmosphère retiennent une partie de la chaleur émise par notre planète. **Sans lui** la température à la surface de notre planète serait d'environ -18°C et la **vie** serait donc **impossible**.



Principe de l'effet de serre. *lelivrescolaire.fr / Météo et climats*

Quand la lumière solaire atteint la Terre, une partie est renvoyée ou absorbée par l'atmosphère. Le reste parvient à la surface de notre planète où une partie est à nouveau réfléchi.

Environ la moitié de l'énergie du rayonnement solaire est absorbée par la Terre, qui se réchauffe par ce processus. Cette énergie est ensuite libérée sous forme de rayonnement infrarouge et donc de chaleur. Une petite partie de ces rayons traversent l'atmosphère, tandis que la plus grande partie est absorbée par des gaz, appelés "**gaz à effet de serre**", naturellement présents dans celle-ci.

Mais aujourd'hui, cet **équilibre est perturbé**. En effet, les activités humaines rejettent de grandes quantités de gaz à effet de serre (GES) qui s'accumulent dans l'atmosphère. La quantité de chaleur alors piégée est de plus en plus importante, ce qui réchauffe davantage la planète.). C'est le réchauffement climatique.

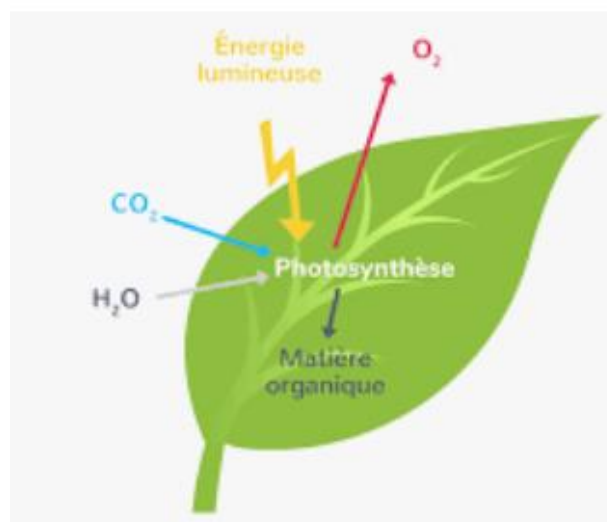
Depuis 1850, la température moyenne à la surface de la Terre a gagné $1,2^{\circ}\text{C}$ et le phénomène ne fait que s'accélérer !

Le principal gaz à effet de serre produit par les activités humaines est **le dioxyde de carbone (CO₂)**.

2.2 Impact des toits végétalisés sur l'absorption du CO₂

a) La photosynthèse :

Les végétaux chlorophylliens sont autotrophes, c'est-à-dire qu'ils fabriquent leur propre matière organique à partir de matière minérale. Ce processus appelé photosynthèse consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique. Il nécessite l'absorption de dioxyde de carbone (CO₂) d'eau (H₂O) et de sel minéraux et s'accompagne du rejet de dioxygène (O₂).



Principe de la photosynthèse

kartable.fr

b) Expériences sur la photosynthèse

Nous voulons vérifier que les végétaux absorbent bien le CO₂.

Hypothèse : Les végétaux verts absorbent le dioxyde de carbone en présence de lumière.

Pour tester cette hypothèse nous avons établi **le protocole suivant** :

- Réalisation de l'expérience témoin : dans une enceinte hermétique, ne contenant aucune matière végétale, on place un capteur de CO₂. On éclaire l'enceinte et on observe la variation du taux de CO₂ dans l'enceinte au cours du temps.
- Réalisation de l'expérience test : dans une enceinte identique à celle du témoin, on place une plante verte avec un capteur de CO₂ et on éclaire avec la même puissance lumineuse que le témoin. On observe la variation du taux de CO₂ dans l'enceinte au cours du temps.



Expériences de mise en évidence de l'absorption du CO₂ par les plantes

Résultats attendus :

Dans l'expérience témoin, le taux de CO₂ doit rester stable alors qu'il doit diminuer en présence de la plante.

Résultats de l'expérience :

Les résultats obtenus ne sont pas ceux attendus. En effet, dans l'enceinte témoin, le taux a augmenté et il est resté stable dans l'expérience test. On constate bien une différence entre les 2 expériences mais cela ne met pas en évidence l'absorption du CO₂ par les plantes.

Nous nous sommes alors longuement interrogés sur la cause de ce résultat inattendu : L'enceinte est-elle bien hermétique ? La matière plastique de l'enceinte a-t-elle une influence ? Le végétal choisi est-il bon pour mettre en évidence la photosynthèse ? Les capteurs sont-ils fiables ?

Nous sommes intervenus sur ces différents éléments, un à un, et refait l'expérience après chaque modification.

Modification du matériel	Résultats de l'expérience identiques à ceux attendus ?
Inversement des capteurs	NON
Obturation renforcée des ouvertures de l'enceinte par du blu tack et ruban adhésif.	NON
Changement du végétal par une plante ayant plus de surface foliaire	NON
Changement de l'enceinte en plastique par une enceinte en verre	NON

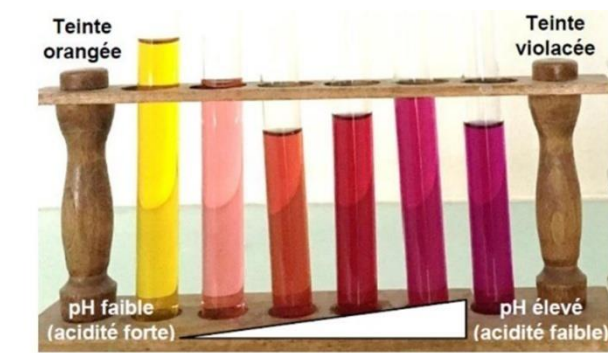
Face à tous ces résultats non conformes à nos attentes, nous en avons déduit que le **problème** devait venir des **capteurs**. Même si nous y avons déjà pensé dès le départ, nous préférons tester les différentes possibilités car nous n'avions pas d'autres capteurs à notre disposition.

Notre professeur de SVT nous a alors suggéré une autre méthode pour mettre en évidence l'absorption de CO_2 : L'utilisation du **rouge de crésol**.

➤ Le rouge de Crésol :

Le *rouge de Crésol* est un indicateur coloré sensible au pH. Sa couleur varie en fonction du pH, c'est-à-dire de son acidité.

Dans notre expérience, il sera utilisé comme indicateur de la quantité de dioxyde de carbone dissous dans la solution. Dans l'eau, le dioxyde de carbone se transforme en ions, ce qui la rend plus acide. Ainsi, plus la teneur en dioxyde de carbone d'une solution est élevée, plus son acidité sera importante (et donc son pH sera faible).



rodriguezgeologie.files.wordpress.com

Couleurs du rouge de Crésol en fonction de son pH

Expérience 1 :

Nous plaçons une plante sous une cloche en verre avec un petit pot contenant du rouge de Crésol à pH 7,5. (couleur orange). On éclaire avec des lampes horticoles afin de favoriser la photosynthèse. Au bout de 3 heures, on observe la couleur du rouge de Crésol.

On réalise l'expérience témoin : elle se fait dans les mêmes conditions mais sans plante sous la cloche.



Expérience témoin



Expérience test

Résultats attendus :

Expérience test : le rouge de Crésol a viré au rouge voire au violet.

Expérience témoin : le rouge de Crésol ne change pas de couleur.

Résultats de l'expérience :

Expérience test : Le rouge de Crésol rouge foncé.

Expérience témoin : le rouge de Crésol rouge orangé (plus rouge qu'au départ).

Observations :

On observe que le **rouge de Crésol** a changé de couleur dans **l'expérience test**, en virant **rouge foncé**. Des gouttelettes d'eau sont présentes sur les parois de l'enceinte.

Dans **l'expérience témoin**, le rouge de Crésol a également un peu **changé de couleur mais moins**.

Interprétation :

Pour le témoin, le rouge de Crésol n'aurait pas dû changer de couleur et rester orange. Or, ce changement de couleur indique une diminution de CO₂ sous la cloche, ce qui est étonnant.

En présence de la plante, le rouge de Crésol a viré au rouge foncé, ce qui signifie que la quantité de CO₂ présente sous la cloche a diminué.

La différence de couleur du rouge de Crésol entre le témoin et le test montre toutefois que la plante a consommé du dioxyde de carbone.

La présence de gouttelettes d'eau provient du phénomène d'évapotranspiration. (Evaporation de l'eau au niveau du sol et transpiration des plantes)

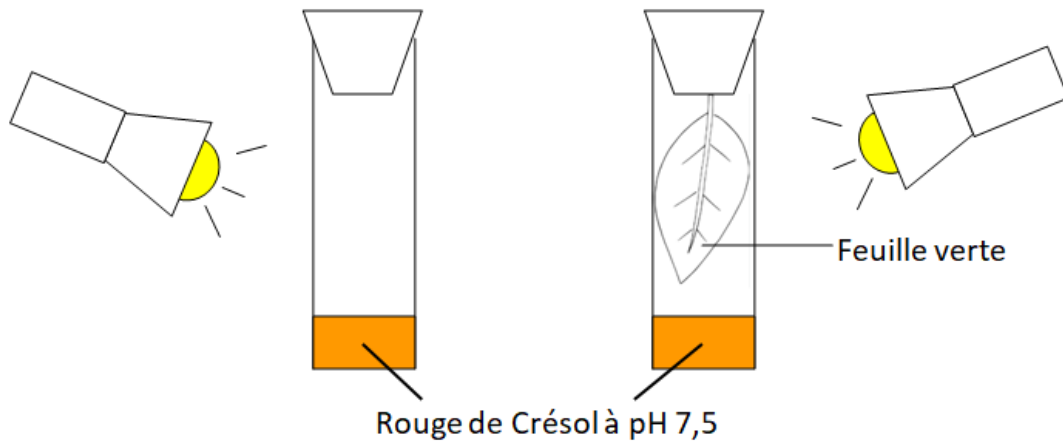
Critique :

Le résultat obtenu avec le témoin n'étant pas celui attendu, nous ne sommes pas entièrement satisfaits de l'expérience et **nous ne pouvons pas valider à 100% notre hypothèse**.

La durée de l'expérience est-elle trop longue par rapport à la stabilité du rouge de Crésol ? Il y a-t-il une autre raison que nous ne comprenons pas ?

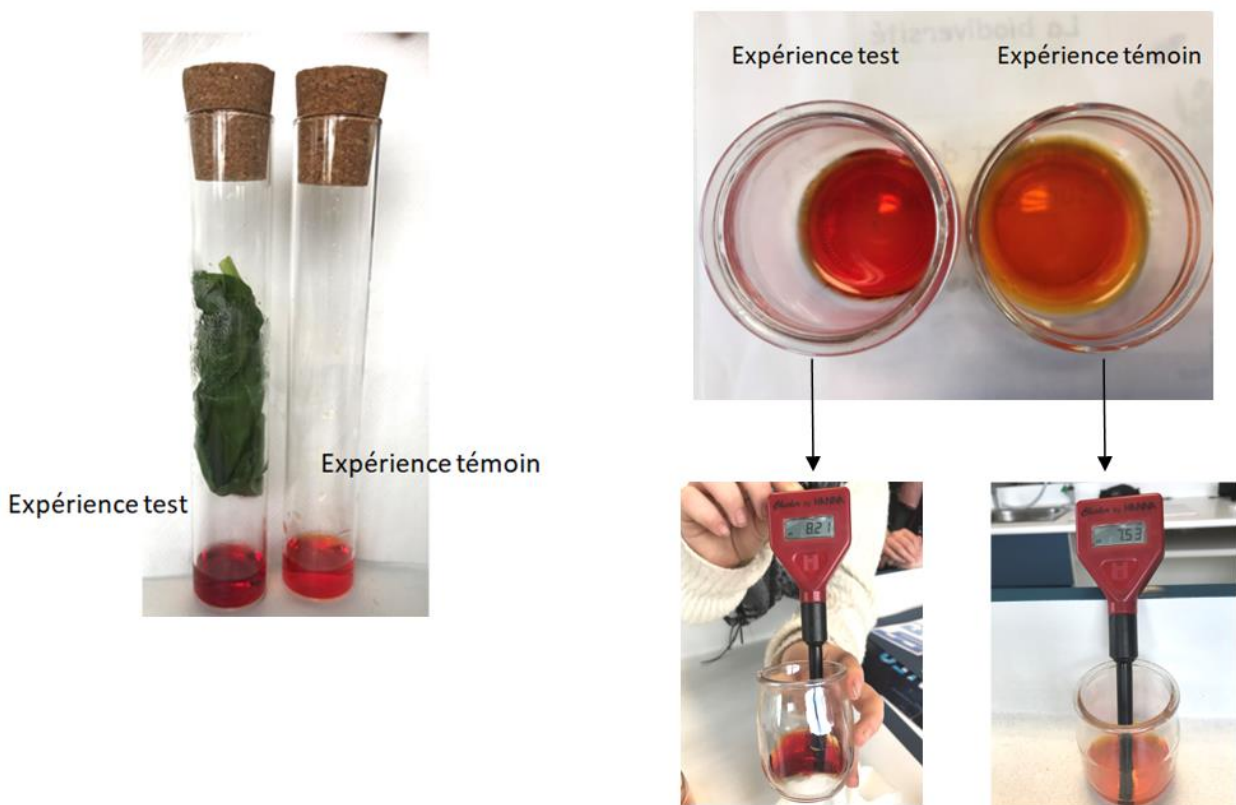
Après des recherches sur internet et sur les conseils de nos enseignants, nous avons décidé de refaire l'expérience dans des tubes à essai en utilisant uniquement les feuilles des plantes.

Expérience 2 :



On observe les résultats au bout de 2 heures.

Résultats :



Observations :

Expérience témoin : Le rouge de Crésol n'a pas changé de couleur. Son pH est de 7,53 donc identique à celui du début de l'expérience.

Expérience Test : le rouge de Crésol a viré au rouge et indique un pH de 8,3.

Interprétation :

En l'absence de feuille, le pH ne change pas. Le taux de CO₂ dans le tube n'a pas changé. En présence de la feuille, le pH a augmenté ce qui montre une diminution de CO₂ dans le tube. La feuille a consommé du dioxyde de carbone.

Conclusion :

Notre hypothèse est validée (enfin !). Les végétaux absorbent du CO₂ en présence de lumière, au niveau des feuilles.

La végétalisation des toits permettrait donc de diminuer la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et ainsi d'atténuer le phénomène de réchauffement climatique.

2.3 Toits végétalisés et isolation thermique

L'hiver, nous devons chauffer nos habitations. L'été, avec les vagues de chaleur de plus en plus intenses, l'utilisation de climatiseurs se développe.

- Selon l'ADEME², les taux d'équipements en climatisation chez les ménages sont en constante augmentation, passant de 14% en 2016 à 25% en 2020. Tout cela consomme de l'énergie et par conséquent entraîne une production importante de CO₂. C'est le cas également pour les entreprises. La climatisation est aujourd'hui responsable de près de **5% des émissions d'équivalent CO₂** du secteur bâtiment.
- Les émissions de CO₂ concernant le chauffage sont variables en fonction du système utilisé mais dans tous les cas ne sont pas négligeables.

Les émissions de CO₂ par énergie de chauffage pour la consommation d'1 kilowattheure

Système de chauffage	Emission de CO ₂
Chaudière à bois	30 gCO ₂ e/kWh
Pompe à chaleur	49 gCO ₂ e/kWh
Réseau de chaleur	100 gCO ₂ e/kWh
Radiateur électrique	147 gCO ₂ e/kWh
Chaudière gaz	227 gCO ₂ e/kWh
Chaudière fioul	324 gCO ₂ e/kWh

Source : **Ademe** et Carbone 4 (2018)

² ADEME : Agence de l'environnement et de l'énergie

Nous cherchons à montrer que la présence d'un toit végétalisé permet une meilleure isolation de l'intérieur du bâtiment et donc une réduction de production de CO₂.

Nous avons réalisé **des expériences** concernant uniquement l'effet des toits verts sur **l'isolation des bâtiments par rapport au phénomène de chaleur**. En effet, les phases de canicule en France sont de plus en plus fréquentes et risquent de s'amplifier. Il est donc nécessaire de s'y intéresser.

De plus, il n'était pas possible pour nous de mener des expériences pour mettre en évidence l'isolation par rapport au froid.

Hypothèse : Les toits végétalisés permettent de mieux isoler les bâtiments de la chaleur.

Réalisation de maquettes

Nous avons construit des maquettes d'immeuble pour avoir un toit plat. Le socle est en aggloméré, les murs en Balsa et le toit en pvc.

Sur le toit, il y a un bac transparent avec un tuyau pour la récupération d'eau afin de réaliser également l'étude sur la rétention d'eau.



Réalisation des maquettes d'immeubles

Dans un des bacs, un **toit végétalisé** est créé. Il servira **d'expérience test**. Pour cela, nous avons demandé des conseils pour le choix des végétaux à la pépinière « Les botaniques du Val d'Ouve » qui nous a aussi offert les plantes choisies. Nous avons pris en compte les indications de Guillaume Coat, de l'entreprise « Jardins en cascades » pour concevoir notre maquette de toit végétalisé.



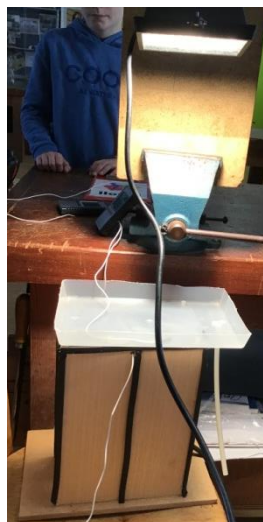
Maquette avec toit végétalisé

Pour l'**expérience témoin**, le **bac** restera **vide**.

Expériences :

Les 2 maquettes sont exposées à une lumière d'une puissance de 120 Watts pendant 15 minutes. On mesure l'évolution de la température sur le toit et à l'intérieur du bâtiment, toutes les minutes.

Remarque : Il aurait été préférable d'avoir deux bacs en plastique identique même si nous pensons que cela a peu d'influence sur le résultat final.



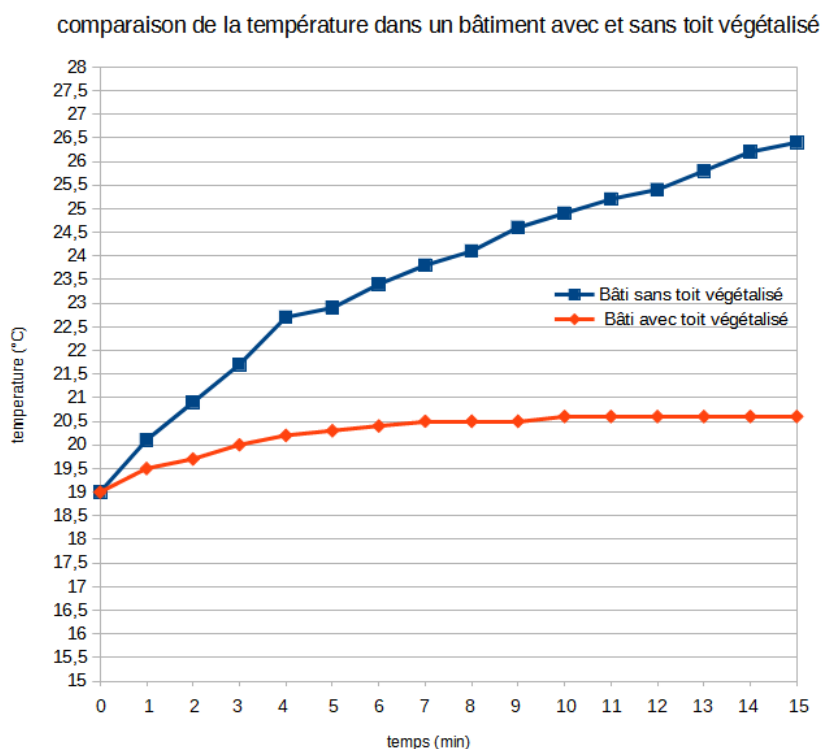
Expérience sur l'isolation des bâtiments par un toit vert

Résultats attendus :

- La température doit être moins élevée dans le bâtiment végétalisé.
- La différence entre la température sur le toit et à l'intérieur du bâtiment doit être plus importante avec un toit végétalisé qu'avec un toit non végétalisé.

Résultats de l'expérience :

Temps (en minutes)	Température (en °C)	
	Bâti sans toit végétalisé	Bâti avec toit végétalisé
0	19	19
1	20,1	19,5
2	20,9	19,7
3	21,7	20
4	22,7	20,2
5	22,9	20,3
6	23,4	20,4
7	23,8	20,5
8	24,1	20,5
9	24,6	20,5
10	24,9	20,6
11	25,2	20,6
12	25,4	20,6
13	25,8	20,6
14	26,2	20,6
15	26,4	20,6



	Température pour un bâtiment non végétalisé (en °C)		Température pour un bâtiment végétalisé (en °C)	
	Sur le toit	Dans le bâtiment	Sur le toit	Dans le bâtiment
Début de l'expérience	19	19	19	19
Après 15 min d'éclairage	28,7	26,7	25,5	20,6
Différence de température (en °C) entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment	2		4,9	

Ecart de température entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment selon sa végétalisation lors d'un éclairage d'une puissance de 120 W

Observations :

Dans le bâtiment dont le toit n'est pas végétalisé, la température augmente continuellement et rapidement au cours du temps passant de 19°C à 26,4 °C en 15 minutes.

Dans le bâtiment dont le toit est végétalisé, la température augmente de façon moins importante au cours du temps passant de 19°C à 20,6 °C en 10 minutes puis se stabilise.

La différence de température avec l'extérieur est seulement de 2°C pour un bâtiment dont le toit n'est pas végétalisé alors qu'elle est de 4,9°C quand le toit est végétalisé.

On observe aussi que la température augmente plus sur un toit non végétalisé que sur un toit végétalisé.

Interprétation :

La présence d'un toit végétalisé réduit l'augmentation de la température à l'intérieur d'un bâtiment lors de période de chaleur.

Conclusion :

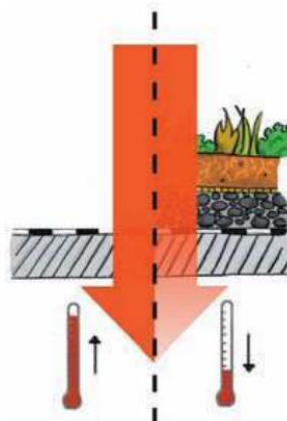
Notre hypothèse est validée. Les toits végétalisés permettent d'isoler les bâtiments de la chaleur. Ils permettent donc de réduire l'utilisation de climatiseurs et donc de réduire les émissions de CO₂.

Remarque : Nous avons fait cette expérience plusieurs fois pour être certains des résultats, avant de conclure. A chaque fois, nous avons observé le même type de résultats que ceux indiqués ci-dessus.

Limites du modèle :

Les matériaux utilisés pour la réalisation des maquettes ne sont pas les mêmes que ceux des immeubles construits dans la réalité. La surface est également plus petite.

Guillaume Coat, professionnel de la création de toits végétalisés nous a confirmé que ces structures favorisaient l'isolation thermique des bâtiments.



3. Impact des toits végétalisés sur la rétention des eaux pluviales

L'urbanisation s'accompagne d'une **imperméabilisation importante des sols**. En effet, les surfaces construites ne permettent pas à l'eau de s'infiltrer dans les sols. Les **pluies ruissellent** en surface et lorsqu'elles sont fortes peuvent **saturer le réseau d'évacuation des eaux pluviales** et causer des débordements et donc des inondations.

Mathilde de TOPAGER, nous a expliqué qu'à Paris, lorsque le réseau débordait, l'eau des égouts se déversait dans la Seine augmentant sa pollution.

Nous voulons montrer que les toits végétalisés permettent une rétention des eaux pluviales et donc de réduire le risque d'inondation.

Hypothèse : Les toits végétalisés retiennent l'eau de pluie.

Expérience:

Les maquettes construites pour montrer l'impact des toits verts sur l'isolation thermique sont celles utilisées pour cette étude. On ajoute cependant une très faible pente sur les toits.

On verse un volume d'eau défini sur le toit des 2 maquettes et on mesure la quantité d'eau recueillie à l'extrémité de la gouttière.

Résultat attendu :

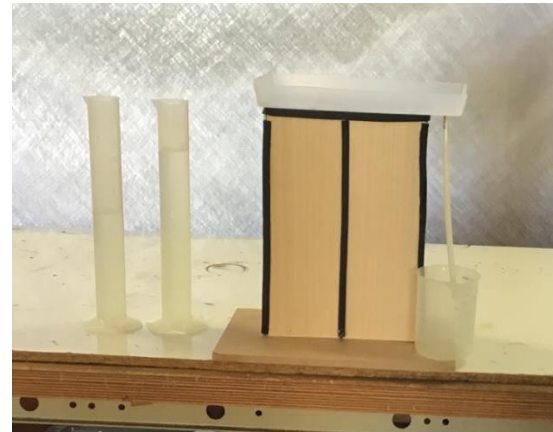
Le volume d'eau recueilli après le passage sur le toit végétalisé est inférieur à celui recueilli après le passage sur le toit non végétalisé.

Résultats de l'expérience :

	Volume d'eau récupéré (en mL)	
	Toit non végétalisé	Toit végétalisé
400 mL d'eau versé sur le toit	375	0
600mL d'eau versé sur le toit	560	52



Volume d'eau recueilli après passage sur le toit végétalisé



Volume d'eau recueilli après passage sur le toit non végétalisé



Expérience sur la rétention de l'eau par les toits végétalisés.

Observations :

Le volume d'eau récupéré lorsque le toit n'est pas végétalisé est beaucoup plus important qu'avec un toit végétalisé et correspond à plus de 93% de l'eau versée sur le toit.

Pour un toit végétalisé, toute l'eau est retenue pour 400 mL d'eau versée. Seulement 52 mL est récupéré pour 600 mL d'eau versée soit environ 8,5%.

Interprétation :

La présence d'un toit végétalisé permet de retenir une grande quantité d'eau. L'eau est stockée dans la couche de drainage et dans le substrat.

Le coefficient de ruissellement est de 0,93 pour un toit non végétalisé.

Le coefficient de ruissellement varie de 0 à 0,08 pour un toit végétalisé.

Le Coefficient de ruissellement (C_r) est le rapport entre la hauteur d'eau qui a ruisselé sur une surface donnée et la hauteur d'eau versée.

Conclusion :

L'hypothèse est validée. Les toits végétalisés retiennent les eaux de pluies, ce qui évite de surcharger les réseaux d'assainissement et limite les risques d'inondation et la pollution des cours d'eau.

Remarques :

- **Pourquoi avoir choisi un volume de 400 mL** au début de l'expérience ?

D'après Météo France, une pluie forte apporte au minimum 8mm d'eau par heure, soit 8 L/m² et par heure. Lors de certains événements majeurs, l'intensité peut atteindre 100 mm /heure.

Compte-tenu de la surface de notre maquette, pour simuler une pluie de 8 L/m², il faut verser à 375 mL d'eau que nous avons arrondi à 400 mL.

Comme 0 mL d'eau a été récupéré pour 400 mL versés, avec un toit végétalisé, nous avons décidé de verser un volume d'eau supplémentaire pour voir ce qui se passait.

- **Que devient l'eau retenue ?**

L'eau sera utilisée par les végétaux et aussi évaporée.

Selon les travaux menés par l'ADIVET, un système de type végétalisation extensive d'une épaisseur de 6 à 10 cm de hauteur peut retenir jusqu'à 50% des précipitations annuelles.

Exemple de gestion des eaux pluviales selon le type de drainage utilisé

(épaisseur du substrat utilisé pour les toits végétalisés 6 cm)



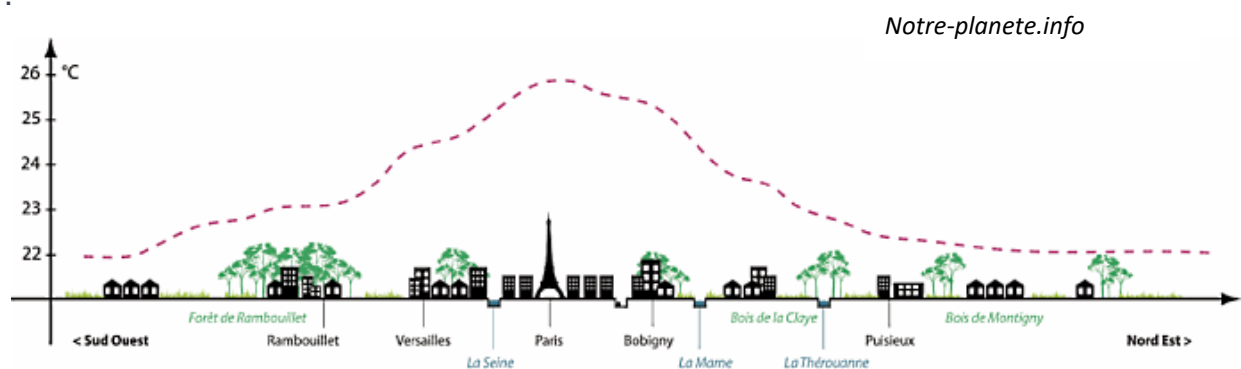
Source <https://www.optigruen.fr/>

OPTIGREEN SOLUTIONS DE RETENTION DES EAUX PLUVIALES

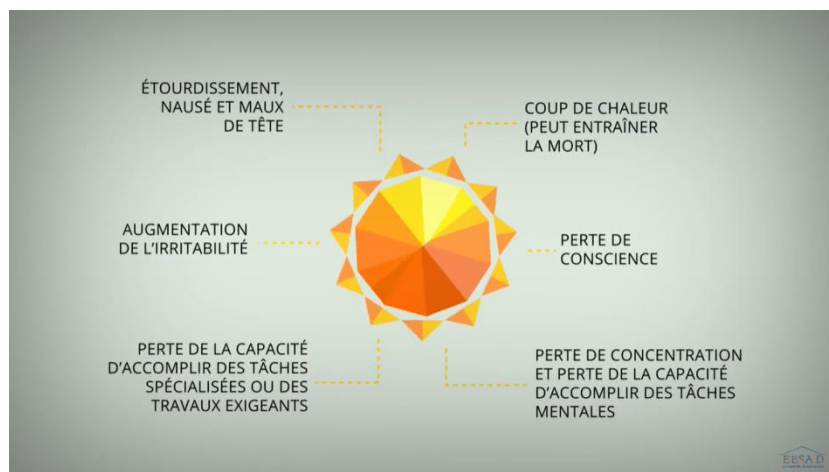
4. Impact des toits végétalisés sur les îlots de chaleur

L'année 2022 a été marquée par plusieurs épisodes de chaleur intense et le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) confirme que les canicules seront à l'avenir plus fréquentes, longues et intenses.

Cela va augmenter le phénomène **d'îlot de chaleur urbain (ICU)**, qui représente la **différence de température entre le centre-ville et la campagne environnante**, et qui provoque des températures de surface très élevées de certains matériaux. Ainsi, les écarts peuvent aller de 2°C à 7°C, voire 10°C en période caniculaire.



Ce phénomène rend la vie des habitants inconfortable mais plus grave, il augmente la pollution de l'air et peut être dangereux pour leur santé.



Le stress thermique : Effets des îlots de chaleur sur la santé
Monclimatetmoi.ca

A quoi sont dus les îlots de chaleur ?

- A la hauteur et la densité du bâti : plus les immeubles sont hauts et serrés, plus ils bloquent le passage du vent et réfléchissent les rayons du soleil;
- Aux matériaux de construction : la pierre, la brique ou le béton qui accumulent la chaleur de l'air et les rayons du soleil dans la journée, pour les relâcher la nuit, C'est aussi le cas pour les sols minéraux ou bitumeux.

- Aux activités humaines : réseaux de chaleurs, usines, véhicules...

La nuit, les températures restent donc élevées.

Comment lutter contre les îlots de chaleur en ville ?

Hypothèse : les toits végétalisés diminuent le phénomène des îlots de chaleur en ville.

Expérience :

Deux maquettes d'une même surface sont construites.

L'**une** contient uniquement de la **matière minérale** comme on peut la trouver en milieu urbain : parpaing, ardoise, goudron, pierre.

L'**autre** est composée de **végétaux** plantés dans la terre : des Sedum, un Carex, du lierre et une fougère.



Maquette surface minérale



Maquette surface végétale

On éclaire avec des spots d'une puissance totale de 270 watts chaque surface pendant la même durée et on mesure l'élévation de la température au cours du temps.

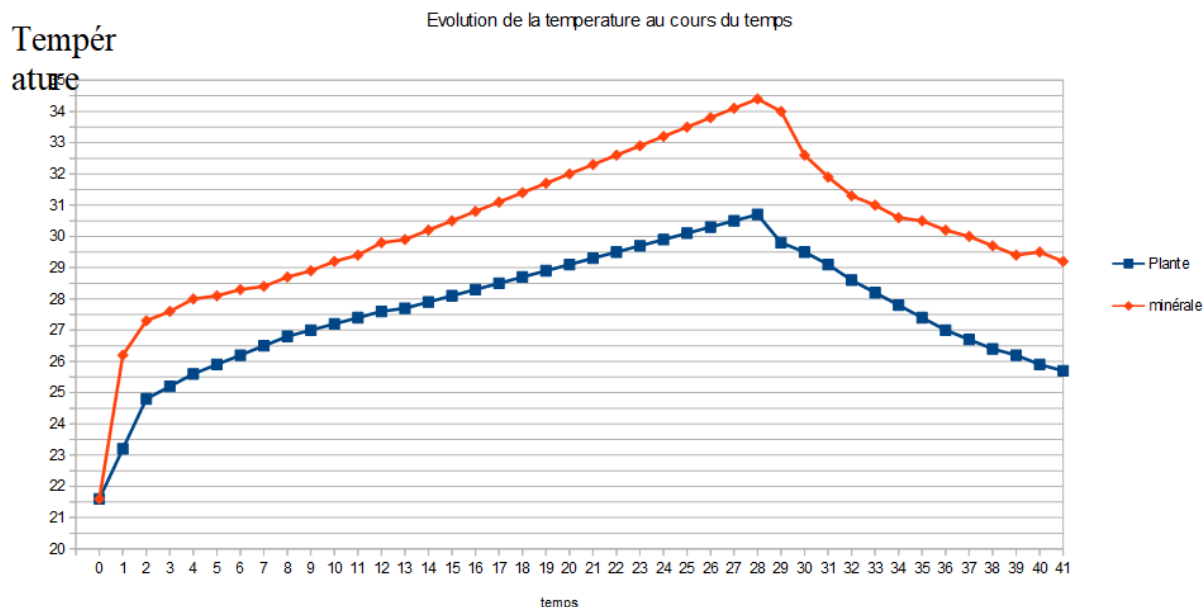


Première expérience sur l'effet des toits verts sur les ICU

Résultats attendus :

La température à la surface du bac contenant de la matière minérale doit être plus élevée qu'à la surface du bac végétalisé.

Résultats de l'expérience :



temps (mn)	Plante T °C	minérale T °C
0	21,6	21,6
1	23,2	26,2
2	24,8	27,3
3	25,2	27,6
4	25,6	28
5	25,9	28,1
6	26,2	28,3
7	26,5	28,4
8	26,8	28,7
9	27	28,9
10	27,2	29,2
11	27,4	29,4
12	27,6	29,8
13	27,7	29,9
14	27,9	30,2
15	28,1	30,5
16	28,3	30,8
17	28,5	31,1
18	28,7	31,4
19	28,9	31,7
20	29,1	32
21	29,3	32,3
22	29,5	32,6
23	29,7	32,9
24	29,9	33,2
25	30,1	33,5
26	30,3	33,8
27	30,5	34,1
28	30,7	34,4
29	29,8	34
30	29,5	32,6
31	29,1	31,9
32	28,6	31,3
33	28,2	31
34	27,8	30,6
35	27,4	30,5
36	27	30,2
37	26,7	30
38	26,4	29,7
39	26,2	29,4
40	25,9	29,5
41	25,7	29,2

L'expérience a été réalisée plusieurs fois. Les valeurs ne sont pas exactement identiques mais les écarts de températures entre les 2 bacs sont similaires.

Observations :

La température à la surface du bac minéral augmente de 12,8°C en 28 min passant de 21,6°C à 34,4 °C. A la surface du bac végétal, elle n'augmente que de 7,6°C, passant de 21,6°C à 30,7°C.

Quand l'éclairage artificiel est éteint, la température diminue de 3,2°C en 13 minutes, à la surface du bac végétal et elle diminue de 3,5°C à la surface du bac minéral.

Interprétation :

La présence de végétaux diminue nettement l'élévation de la température en surface. Cela est possible grâce à l'évapotranspiration : lors de la photosynthèse, les végétaux transforment l'eau liquide prélevée dans le sol en vapeur d'eau qui se diffuse ensuite dans l'air ambiant et contribue à le rafraîchir.

La surface minérale absorbe plus la chaleur. La température diminue plus rapidement sur la surface minérale ce qui signifie que la chaleur accumulée par ces matériaux lors de la phase d'éclairage a été plus rapidement relâchée dans l'atmosphère que par les végétaux.

Conclusion :

La végétalisation des bâtiments diminue le phénomène des îlots de chaleur urbains. Notre hypothèse est validée.

Remarque :

Ce sont surtout les toitures semi-intensives et intensives qui ont un impact sur les ICU. Celui des toits extensifs est faible car le substrat est peu épais et les végétaux ne sont que des succulentes rampantes.

Pour être réellement efficace, la végétalisation de la ville doit non seulement être faite sur de grandes surfaces mais aussi utiliser des substrats qui permettront de planter des végétaux variés et ayant plus de surface foliaire.

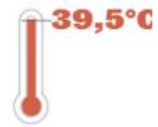
L'idéal serait en plus des toits verts, de végétaliser les façades des bâtiments et de planter des arbres qui offriront en plus des zones d'ombre.

Diminuez la température de votre rue

Moyen d'adaptation :

Toiture végétalisée

Température réelle :
40 °C



Source : Ademe
Infographie : Le Monde et Audrey Lagadec

Diminuez la température de votre rue

Moyen d'adaptation :

Toiture et façade végétalisées

Température réelle :
40 °C



Source : Ademe
Infographie : Le Monde et Audrey Lagadec



Construction d'une maquette d'un îlot de chaleur, constituée de matière minérale

Construction d'une maquette d'un îlot de fraîcheur, constituée de végétaux

5. Impact des toits végétalisés sur la biodiversité

La biodiversité est la diversité des êtres vivants dans un milieu donné.

L'**urbanisation** entraîne une artificialisation des sols et dégrade donc les milieux naturels, ce qui provoque une **baisse de biodiversité**. Dans un lieu totalement artificialisé, comme c'est le cas dans certaine zone en ville, la biodiversité est totalement inexistante.

Nous avons émis **l'hypothèse suivante** :

Les toitures végétalisées favorisent la biodiversité en ville.

Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait faire des comptages des différents êtres vivants présents avant et après la végétalisation de plusieurs toitures. Cela est impossible pour nous.

Nous avons donc effectué des **recherches documentaires et utilisé une étude scientifique** que l'entreprise Topager nous a fournie :

L'étude GROOVES³ réalisée par l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France entre 2017 et 2019.

Analyse documentaire :

L'étude GROOVES concerne 36 toitures végétalisées de typologies différentes (extensives, semi-intensives et intensives) situées à Paris et ses alentours. Sur chacune des 36 toitures, la flore, la faune (dont pollinisateurs), les champignons et les bactéries du sol ont été étudiés.

➤ **La flore :**

Au total, environ 400 espèces de plantes ont été observées : 292 espèces de plantes vasculaires ((plantes à tiges, feuilles et racines) dont 70 % sont spontanées (véhiculées par le vent ou la faune), des mousses et des lichens.

Parmi les espèces les plus fréquentes, on note les Sedum, fréquemment utilisés dans la végétalisation des toitures. Des espèces rares ont également été observées, comme des Ornithopes.



Sedum

Etude Grooves



Ornithopus pinnatus
inpn.mnhn.f

³ <https://iees-paris.fr/ecologie-des-toitures-vegetalisees-groove/>

Les toitures végétalisées permettent d'avoir une biodiversité florale variée, parfois rare en ville d'une part par les végétaux plantés mais aussi par les plantes qui viennent spontanément s'y installer.

La richesse de la biodiversité est plus importante pour les toits végétalisés semi-intensifs et intensifs car l'épaisseur du substrat est plus grande.

➤ **La faune :**

611 espèces d'invertébrés sont observées sur ces toitures :

- une diversité importante en cloportes, myriapodes (mille-pattes) et collemboles (détritivores qui recyclent la matière organique).
- des phytophages : coléoptères, orthoptères (criquets et sauterelles) et hémiptères (punaises et cicadelles).
- de nombreux arthropodes prédateurs : araignées, les hyménoptères (ordre d'insectes regroupant notamment les abeilles, les guêpes, les fourmis et les frelons) et certains coléoptères.

Comme pour les plantes, plus le substrat est épais, plus la diversité en invertébrés est importante.

Aménager des zones-refuge pour la faune comme des nichoirs à oiseaux et chauves-souris, abris à insectes, bois mort, etc, favorisera encore plus la biodiversité.



Toiture intensive de la Seine musicale, à Boulogne-Billancourt, est déjà colonisée par 22 espèces de plantes spontanées et 65 espèces d'invertébrés, dont le grillon bordelais, rare dans la région.
Etude Grooves



Réalisation du protocole SPIPOLL sur la toiture de la Cité de la mode et du design à Paris © Gilles Lecuir | ARB IdF

Réalisation d'un inventaire des invertébrés.
Etude Grooves

➤ **Comparaison avec les espaces verts urbains situés au sol :**


Selon l'étude, les toitures abritent en moyenne une diversité en plantes équivalente à celle rencontrée dans les friches et les parcs urbains. La flore peut même être plus riche pour les toitures semi-intensives et intensives.

Ces deux catégories de toitures abritent une diversité en pollinisateurs comparable aux autres espaces verts urbains.

En comparant les espèces d'invertébrés les plus présentes sur les toitures avec celles des milieux urbains, on peut distinguer **3 groupes** :

Les Toiturophyles


- très fréquentes sur les toitures mais rares sur le sol urbain
- ex : La thomise rayée



• animateur-nature.com

Les Généralistes


- communes sur les toits et le sol
- ex : le gendarme



• wikipedia

Les Toiturophobes

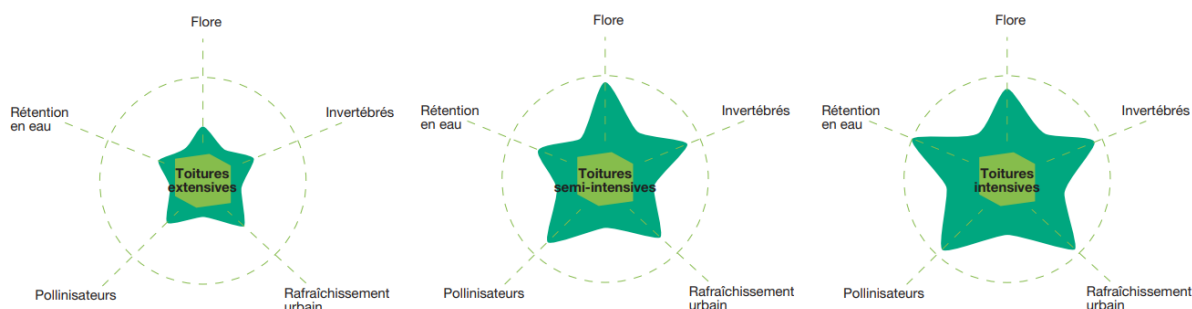
- rares sur les toits mais communes sur le sol
- ex : la punaise nébuleuse



• wikipedia

La hauteur du bâtiment influence aussi la biodiversité. L'effet semble positif sur la richesse en plantes jusqu'à environ 10 mètres de hauteur, soit trois étages, au-delà elle n'augmente plus.

Comparaison de l'efficacité des services écosystémiques rendus par les toitures en fonction de leur typologie



Source <https://www.arb-idf.fr>

Conclusion :

L'installation de toits végétalisés permet la création et/ou l'amélioration de la biodiversité en milieu urbain. Les études réalisées montrent que ces structures favorisent la présence de végétaux, d'insectes, d'araignées, d'oiseaux et de la microfaune du sol.

Conclusion générale

Avec ce projet, nous voulions montrer l'intérêt de créer des toits végétalisés en milieu urbain. Les différentes études que nous avons faites mettent en évidence leurs impacts positifs sur l'écologie à plusieurs niveaux : sur le taux de dioxyde de carbone, la rétention des eaux pluviales, les îlots de chaleur urbain et la biodiversité.

Il y a d'autres effets positifs de ces toits verts que nous n'avons pas traités dans notre projet comme ceux sur la qualité de l'air ou le bien-être des citoyens.

Avec le réchauffement climatique qui risque de s'aggraver encore, il est urgent de trouver des solutions pour limiter ses conséquences. La végétalisation des toits est une solution en ville. Il faudrait développer aussi la végétalisation des façades et la plantation d'arbres au sol.

Nous pouvons affirmer que l'avenir est tourné « vert toit ».