

# SAVOIR-FAIRE

Ressources pour un  
Environnement Vert  
en Seine-Saint-Denis

REVES

## ETUDE COMPARATIVE DE 3 ANS DE RÉSULTATS D'ANALYSES DE SUBSTRATS DE TOITURE VEGETALISEE

Suivis des paramètres physiques,  
chimiques et biologiques

---

Août 2017

# SOMMAIRE

---

## INTRODUCTION 3

---

Un projet de substrats pour tester des matériaux alternatifs sur toiture au parc Georges-Valbon 4

---

**I. Les objectifs de l'expérimentation 4**

I - 1. tester des matériaux de déconstruction 4

I - 2. sélectionner une palette végétale adaptée à ce nouveau milieu : la toiture végétale 4

I - 3. minimiser la gestion et l'entretien afin de réduire les coûts de gestion des toitures végétales 5

**II. le protocole scientifique 5**

Des résultats sur trois ans d'expérimentation 6

---

**I. Des analyses pour bien comprendre le fonctionnement des sols 6**

**II. Evolution des caractéristiques physiques pour rendre compte de la stabilité et de la composition des sols 6**

**III. Evolution des caractéristiques chimiques pour bien appréhender la fertilité des sols 8**

**IV. Evolution des caractéristiques biologiques pour rendre compte de la dynamique de minéralisation des sols 11**

**V. Faune du sol 13**

## CONCLUSION 16

---

### Glossaire

Etude réalisée par  
Le Laboratoire LAMS  
Dr Emmanuel Bourguignon  
[ebourguignon@lams-21.com](mailto:ebourguignon@lams-21.com)  
03 80 75 61 50

Vulgarisation et suivi de l'expérimentation  
DIRECTION DE LA NATURE DES PAYSAGES ET DE LA BIODIVERSITÉ  
Conseil Départemental de la Seine-Saint-Denis

Mehdi Azdoud - Chargé d'études, Service des Politiques Environnementales et de la Biodiversité, Bureau des Etudes Générales

[mazdoud@seinesaintdenis.fr](mailto:mazdoud@seinesaintdenis.fr)  
01 43 93 11 54

Crédits photographiques & Illustrations  
Département de Seine-Saint-Denis - Dr Emmanuel Bourguignon LAMS

---

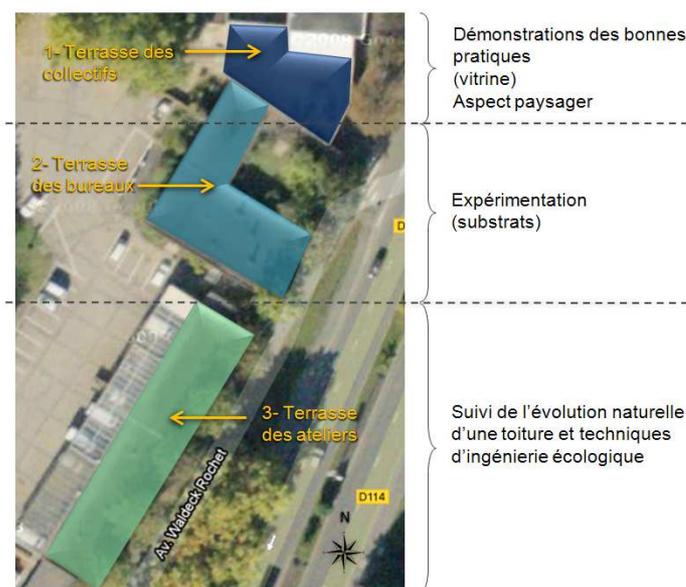
*Ce document fait partie des Ressources pour un Environnement Vert en Seine-Saint-Denis (REVES), plateforme de partage des savoirs et des savoir-faire départementaux sur la nature, les paysages et la biodiversité. Retrouvez toutes les ressources départementales en ligne sur le site <http://parcsinfo.seine-saint-denis.fr> dans la rubrique REVES.*

# INTRODUCTION

Le Département de la Seine-Saint-Denis porte l'ambition, à travers son Observatoire de la Biodiversité Urbaine, d'expérimenter puis de mettre en œuvre des solutions végétalisées alternatives pour plus de nature en ville. Des expérimentations sont en cours : totems, grimpantes, toitures ; elles font l'objet d'analyses sous forme de livrets REVES (parcsinfo.seine-saint-denis.fr, dans la rubrique « Ressources pour les professionnels »).

Concernant les toitures végétalisées, la première expérimentation a débuté dès 2012 par la création d'une toiture vitrine favorable à la biodiversité au centre technique du parc Georges-Valbon. La toiture vitrine qui fait l'objet de suivis d'analyse de sol et d'un suivi flore. En 2013, une autre toiture a été aménagée afin de tester différentes compositions de substrats en vue de trouver des substituts à la pouzzolane ou aux billes d'argile usuellement utilisés.

L'expérimentation déjà suivie sur 3 ans, vise effectivement à utiliser des matériaux recyclés et locaux de manière à éviter d'avoir une empreinte carbone élevée et à avoir des éléments de comparaison avec les matériaux généralement utilisés par les professionnels (pouzzolane, bille d'argile).



Localisation des toitures  
Parc Georges-Valbon-services techniques

Les substrats pour toitures sont fondamentaux dans la réussite d'une végétalisation. Ils doivent répondre à des fonctions et contraintes techniques très poussées : être le support d'une végétation en assurant son alimentation hydrique et minérale dans des conditions extrêmes (d'extensivité et de sécheresse), en induisant le minimum de charge possible au bâtiment (densité et épaisseur faibles) et en limitant les interventions sur les toits.

A ce jour, peu d'expérimentations sur des substrats alternatifs existent. En effet, de nombreux professionnels proposent des toitures toutes faites sans en comprendre les tenants et aboutissants. La connaissance du sol et de son fonctionnement va permettre de bien analyser son comportement et d'avoir un champ d'actions plus réfléchies.

Pour mener l'expérimentation, un protocole scientifique rigoureux a été défini grâce à un réseau d'organismes-partenaires : le Conservatoire National Botanique du Bassin Parisien pour la sélection de plantes adaptées aux conditions particulières des toitures, l'Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement dans la sélection des substrats ainsi qu'un bureau d'études pour la mise en place de la toiture, et ce sous la tutelle du Comité scientifique de l'Observatoire départemental de la biodiversité urbaine (ODBU).

Ce document présente les résultats d'analyse du sol de la toiture expérimentale dédiés aux tests de substrats. Les suivis flore n'ont pas encore été croisés avec les suivis d'analyse de sol. A terme, cette étude nous permettra de faire des recommandations pour l'aménagement de toitures « durables ».

# Un projet de substrats pour tester des matériaux alternatifs sur toiture au parc Georges-Valbon

---

## I. Les objectifs de l'expérimentation

### I - 1. tester des matériaux de déconstruction

L'objectif de la toiture expérimentale est de reconstituer des substrats adaptés à la végétalisation de toitures, dont les propriétés agronomiques et écologiques permettront le développement de plantes dans des conditions satisfaisantes, tout en minimisant l'impact sur l'environnement.

Plus concrètement, ce projet porte l'ambition de tester de nouveaux substrats réalisés à partir de matériaux de déconstruction. Ils seront dans le cadre de l'expérimentation, comparés à des substrats plus « classiques » afin d'évaluer leurs propriétés agronomiques et écologiques.

La finalité de cette expérimentation réside dans une meilleure compréhension du fonctionnement des technosols et de la biodiversité associée. Par ailleurs, les résultats pourraient contribuer à faire émerger une filière de matériaux recyclés adaptée aux normes constructives de toitures végétalisées et d'un autre côté encourager la production de plantes locales adaptées à ce nouvel habitat urbain.

### I - 2. sélectionner une palette végétale adaptée à ce nouveau milieu : la toiture végétale

Ce sont 20 espèces indigènes qui sont testées sur les 12 parcelles. Les espèces ont été sélectionnées en respectant les critères **d'indigénat et de rareté** en Seine-Saint-Denis (espèces assez communes à très communes) en partenariat avec le Conservatoire Botanique National du Bassin Parisien (CBNBP). De plus, le choix des espèces végétales a été fait en prenant en compte les facteurs les plus limitants sur toiture :

■ **Eau** : espèces mésoxérophiles<sup>1</sup> à xérophiles<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Espèces végétales qui apprécient un sol sec

☑ **Lumière** : espèces héliophiles<sup>3</sup>

☑ **pH** : espèces calcicoles<sup>4</sup>

D'autres facteurs secondaires comme la stratégie de l'espèce ont également été pris en compte (ex : éviter les espèces trop compétitives).

### I - 3. minimiser la gestion et l'entretien afin de réduire les coûts de gestion des toitures végétales

Les végétaux ne sont volontairement pas fertilisés ni irrigués afin de tester leur comportement face aux différents stress (hydriques ou nutritifs). Ils ne feront pas l'objet d'un entretien particulier, si ce n'est la suppression des ligneux, d'annuelles et d'autres plantes indésirables.

Une délimitation au cordeau des zones semées vient compléter le dispositif afin de mesurer précisément le comportement de chaque espèce (coefficient d'abondance, taux de recouvrement, interactions entre espèces...).

## II. le protocole scientifique

Comme tout projet expérimental, le programme a été défini sur la base d'un protocole rigoureux afin de pouvoir valider les résultats avec une objectivité scientifique.

Pour ce faire, quatre types de substrat ont été mis en place, avec à chaque fois 3 répliques par formulation testée : 2 substrats composés de matériaux couramment utilisés en aménagement de toiture (pouzzolane et argile expansée) et les 2 autres composés de matériaux urbains recyclés (béton et tuiles concassés).



L'ensemble des châssis d'expérimentation, de taille identique (36m<sup>2</sup>), sont positionnés dans les mêmes conditions d'exposition. Ils possèdent une épaisseur (20 cm) et une proportion de matériaux similaires en termes de volume (30% de matière organique et 70 % de matière minérale). De même, le plan de végétalisation est identique sur chaque parcelle test.

---

<sup>2</sup> Espèces végétales qui se développent dans des conditions de sécheresse

<sup>3</sup> Espèces végétales qui poussent en pleine lumière

<sup>4</sup> Espèces végétales qui affectionnent les sols calcaires

# Des résultats sur trois ans d'expérimentation

---

## I. Des analyses pour bien comprendre le fonctionnement des sols

Afin d'analyser et de comparer la qualité des substrats ainsi que leurs interactions avec la flore, un état initial a été réalisé sur la base d'analyses physiques, chimiques et biologiques: Les analyses de substrats (année N+1 et N+2) ont été réduites aux paramètres biologiques et à certains critères physiques et chimiques (C/N, quantité d'azote, de carbone), estimant que les micro-organismes sont amenés à fortement se développer et relancer l'activité du sol.

● **Paramètres physiques:** ils concernent principalement la granulométrie, le taux de matière organique, la résistance au tassement, la masse volumique ou encore la rétention maximale en eau...

Ces résultats mettent en évidence les mécanismes de formation des sols ou pédogenèse.

● **Paramètres chimiques:** les facteurs étudiés sont l'acidité (pH), la taille du réservoir nutritif (capacité d'échange cationique), la fertilité (N, P, K, Mg, Na), le taux de carbone ou encore la vitesse de décomposition de la matière organique (C/N).

Ces résultats sont essentiels pour suivre l'évolution des échanges chimiques dans le temps et intervenir en cas de besoin (ex : apport de matière organique).

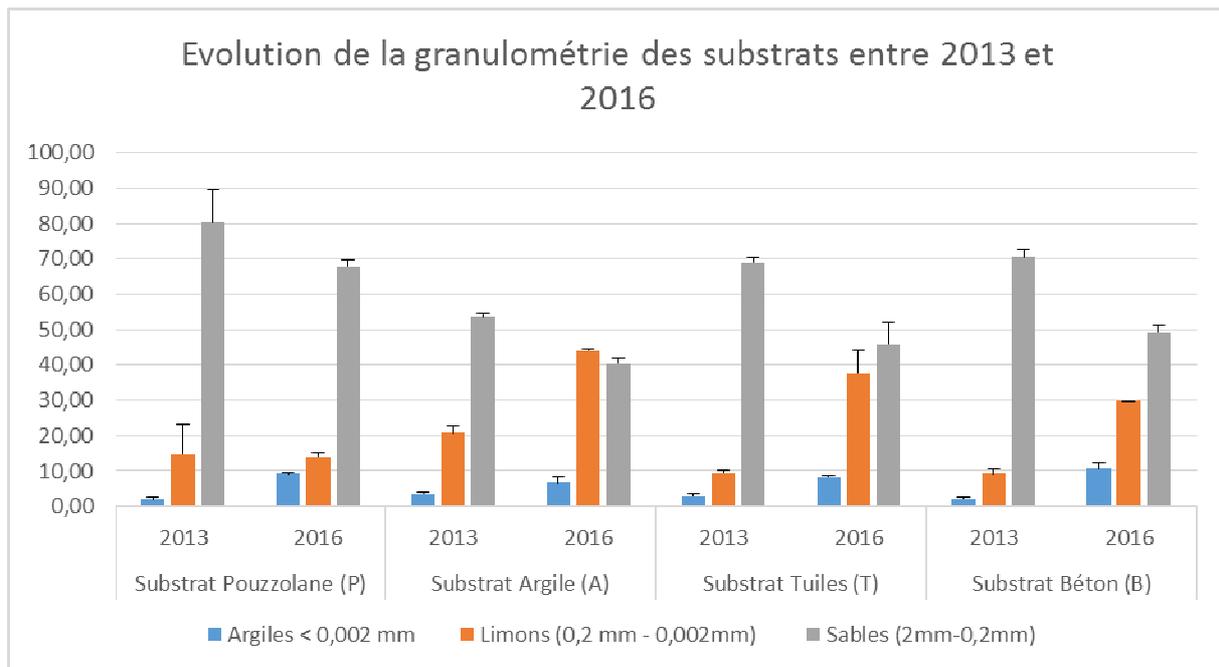
● **Paramètres biologiques:** la biomasse et la respiration microbienne sont les principaux paramètres étudiés.

Ces résultats permettent de quantifier les micro-organismes du sol, de se rendre compte de leur activité, et surtout de déterminer si le substrat reste «vivant» à long terme.

Un suivi de la végétation par le CBNBP a été réalisé parallèlement. A terme, le croisement des deux analyses devrait nous permettre de caractériser les connexions entre le substrat et les plantations.

## II. Evolution des caractéristiques physiques pour rendre compte de la stabilité et de la composition des sols

L'évolution des paramètres physiques ont permis de mettre en évidence un tassement pour tous les substrats entre 2013 et 2016. Il correspond à un processus normal dans la création d'un sol (ou pédogenèse).

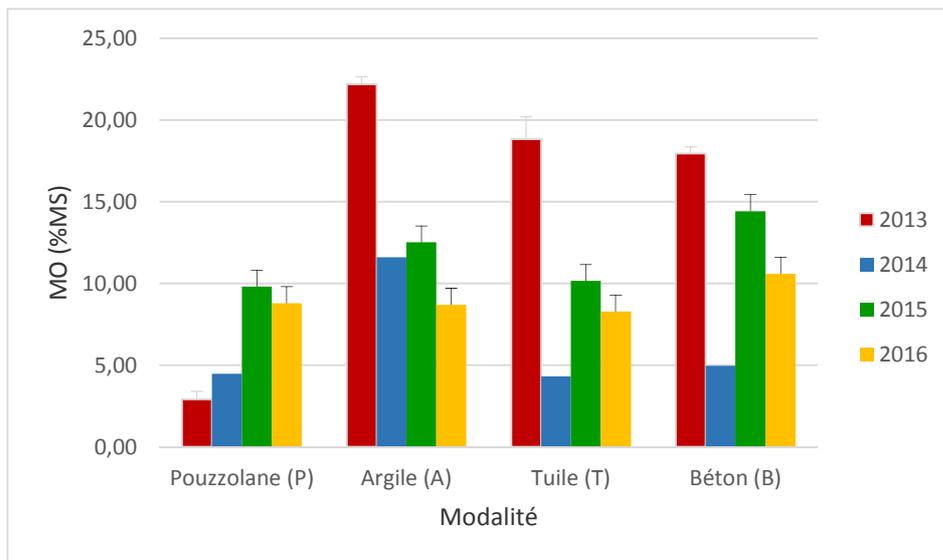


L'étude de la fraction < 4 mm montre que pour l'ensemble des substrats, il y a eu une chute de la teneur en sable (barre grise), une forte augmentation en limon (barre orange) et une légère augmentation du taux d'argile (barre bleue). Cela s'explique par le travail des agents biologiques (plantes et micro-organismes du sol) qui sécrètent des acides organiques attaquant en premier lieu les fractions minérales. Ces dernières sont fragmentées en éléments plus fins.

Les substrats « argile » et « tuile » sont ceux dont la dynamique est la plus rapide suivie par le substrat « béton ». Pour ce qui est du substrat « pouzzolane », il semble présenter une stabilité plus importante.

Ainsi, si l'on considère seulement ce critère, les substrats d'argiles, tuiles et béton sont susceptibles d'être plus intéressants pour la rétention en eau et la prolifération des racines mais au contraire plus sensibles à l'érosion. En effet, les particules fines comme les limons et surtout les argiles forment des sols plus ou moins imperméables. Les espaces entre chaque grain sont minimes. Au contraire, les infractuosités entre les grains de sable sont plus nombreuses et importantes. Cela facilite donc le passage de l'eau et de l'air mais aussi des racines. Le substrat « pouzzolane » lui aura la capacité de perdurer plus longtemps dans le temps et un pouvoir drainant.

Les analyses de matières organiques (MO) permettent de compléter ces propos. En effet, la MO constitue à la fois le ciment des sols mais également le carburant pour l'ensemble des organismes vivants. Elle conditionne fortement la formation d'un sol.



Les mesures démontrent une baisse importante du taux de matière organique entre 2013 (année d'installation des toitures) et 2014 pour 3 substrats (Argile, Tuile, Béton). L'absence de matière organique en début d'expérimentation pour le substrat « Pouzzolane » est ici une erreur d'analyse.

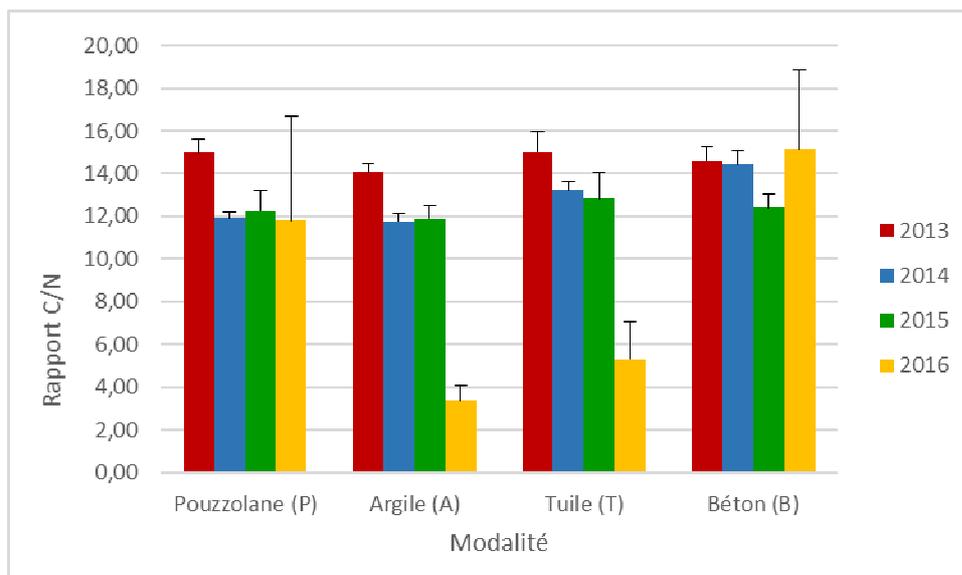
La consommation rapide est un processus courant qui correspond à la minéralisation de la part facilement décomposable de la MO. En effet, chaque substrat a été composé afin de contenir environ la même proportion de MO.

Depuis 2015, les variations de MO sont moins importantes. La végétation présente sur chacun des substrats est en train d'équilibrer le milieu autour des 10 % de MO.

**Ces pourcentages correspondent à ce que l'on retrouve sur des prairies naturelles.**

### III. Evolution des caractéristiques chimiques pour bien appréhender la fertilité des sols

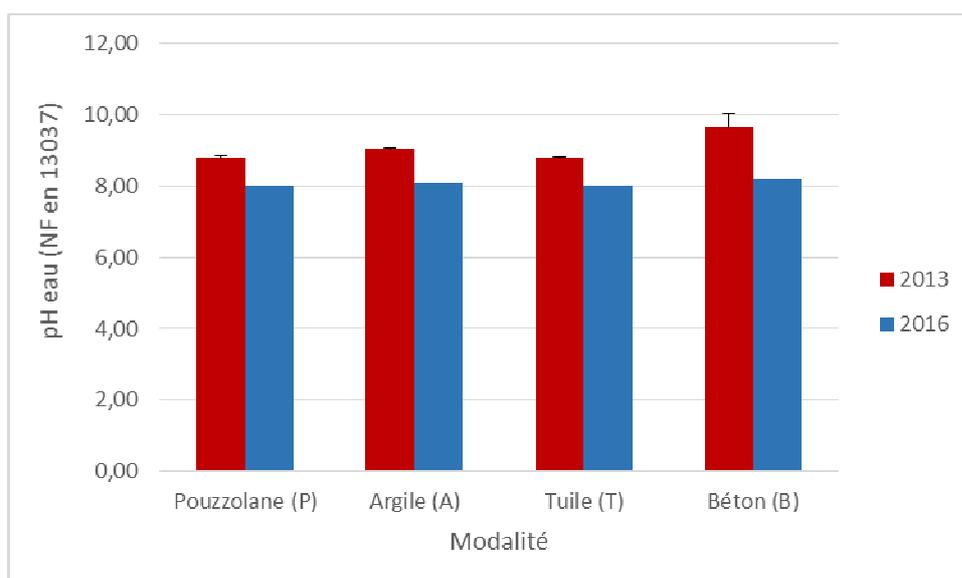
La fertilité des sols s'exprime par différentes modalités : 'éléments organiques disponibles. Le rapport C/N renseigne sur la vitesse de minéralisation de la MO. Il indique ainsi la stabilité du substrat à perdurer dans le temps.



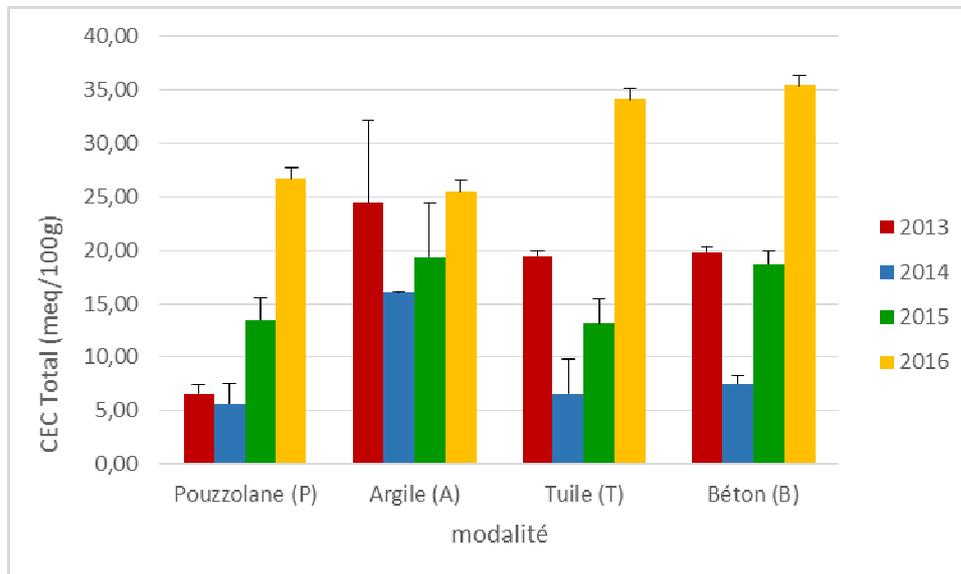
La Pouzzolane et le Béton sont les deux substrats où la décomposition est la plus lente. Ils sont susceptibles d'être les plus longévifs.

Le rapport C/N étant bas pour l'argile et la tuile, la décomposition y est très rapide. Ce rapport bas démontre également la présence d'une grande quantité d'azote. Il est enfin possible que ces deux substrats soient aussi plus sensibles aux variations climatiques. Le taux d'humidité, la chaleur, sont des paramètres qui influent sur les cinétiques de dégradations de la MO et donc de la création d'humus.

La fertilité seule n'est pas suffisante pour estimer la richesse d'un sol. Il est aussi important de prendre en compte les biodisponibilités des éléments et la qualité de la MO. Le pH joue un rôle important dans la mobilisation de ces ressources. En effet, plus il se rapproche de la neutralité et plus il est facile pour la plante de les capter. Comme un bon nombre de sols parisiens, les substrats expérimentaux sont basiques. Depuis 2013, pluie et MO favorisent néanmoins la neutralisation progressive de ces taux. En effet, les pluies urbaines sont souvent acides ce qui a pour conséquence de réduire la basicité des sols.



Dans ces milieux sans réel complexe argilo-humique, la taille du réservoir en éléments nutritifs (Capacité d'Echange Cationique – CEC) dépend principalement de la teneur en matière organique en acides humiques et fulviques. Il est donc normal de constater des variations significatives de la CEC.

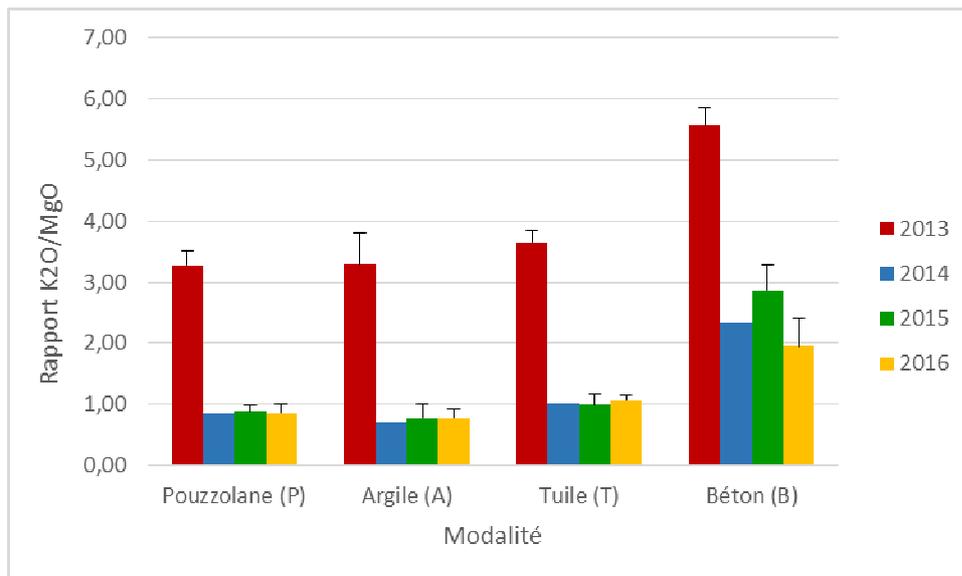


Ainsi pour un même taux de MO mais avec des teneurs différents en acides humiques et fulviques, des substrats pourront avoir de fortes différences dans leur CEC. Les substrats « tuile » et « béton » sont ceux qui présentent les CEC les plus fortes.

Les teneurs en éléments nutritifs comme le phosphore ont augmenté par rapport à 2013 ce qui va dans le sens d'une complexification du milieu grâce au développement des végétaux.

Si les teneurs en éléments nutritifs ont un sens agronomique fort dans le cas d'un espace voué à de la production, ils n'ont ici pas d'effets sur la mise en place de cette expérimentation.

Les carences en éléments n'auront en effet pas les mêmes conséquences sur la façon d'entretenir les toitures que pour un sol agricole. Néanmoins, elles conditionnent les espèces végétales qui devraient s'y développer.

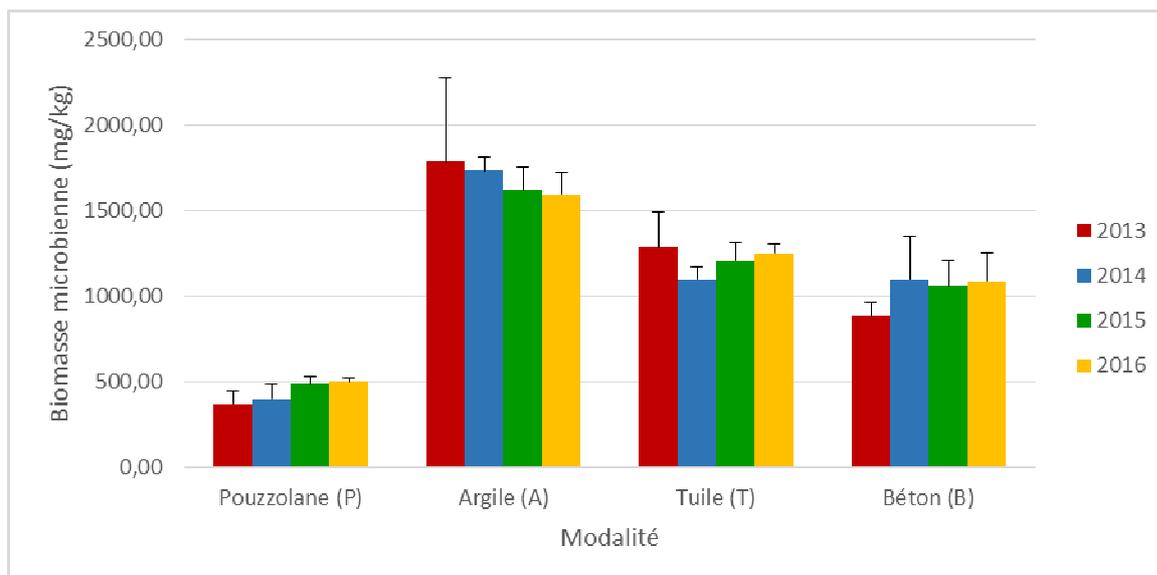


Le graphique ci-dessus donne un ordre d'idée des évolutions en Potassium et Magnésium. En revanche, l'analyse de ce ratio n'a pas de sens dans le cadre de cette expérimentation qui ne vise pas un rendement agronomique.

#### IV. Evolution des caractéristiques biologiques pour rendre compte de la dynamique de minéralisation des sols

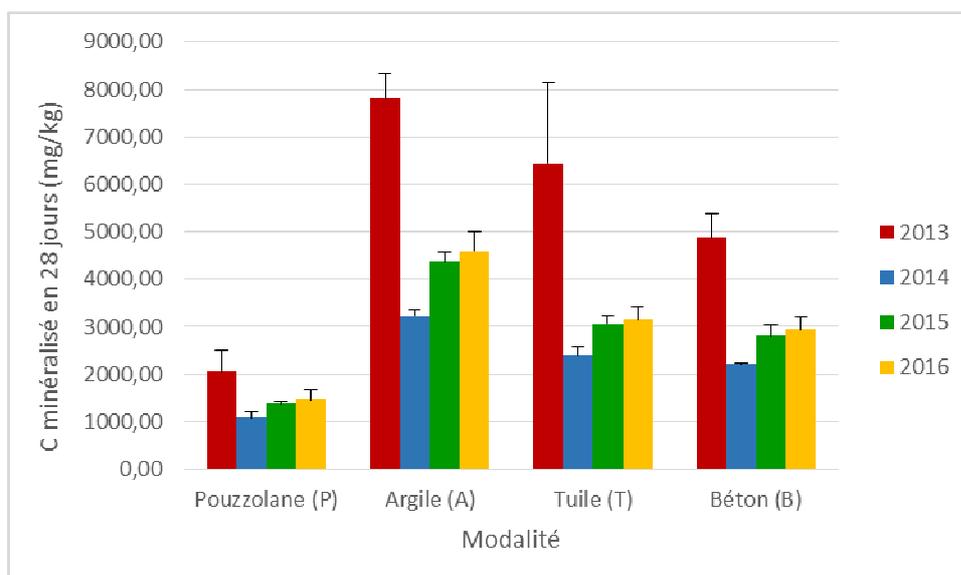
La plus grande disponibilité de l'azote dans les substrats argile et tuile se répercute sur la biomasse microbienne puisque ces deux substrats possèdent les biomasses microbiennes les plus élevées en mg/kg. Une plus grande disponibilité de l'azote stimule les communautés bactériennes dont les vitesses de multiplications sont plus élevées que pour les communautés fongiques par exemple.

La proportion de carbone vivant a donc légèrement augmenté dans les substrats « argile » et « tuile ». Globalement, les ordres de grandeur restent néanmoins les mêmes ce qui indique une stabilisation du milieu.

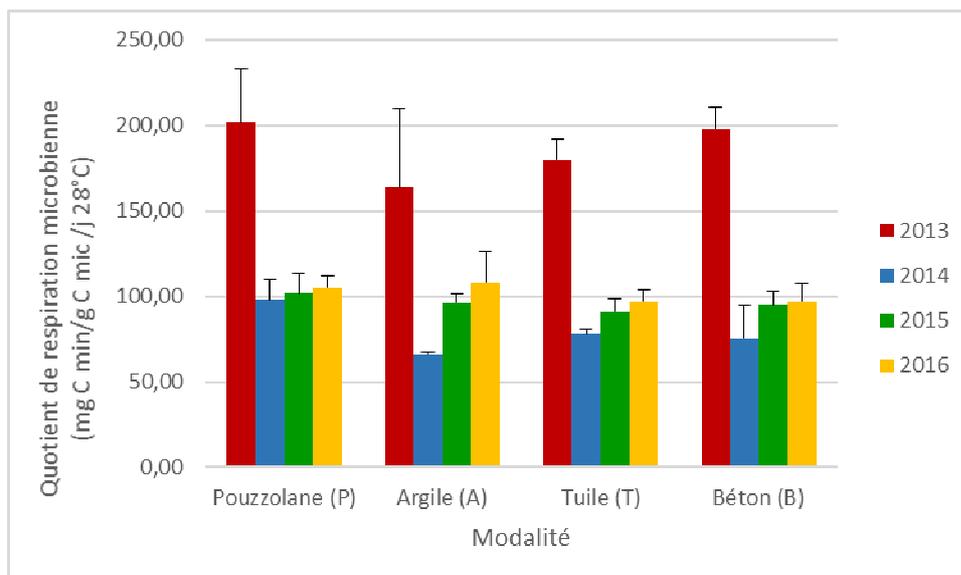


L'activité respiratoire qui renseigne sur la capacité de minéralisation des micro-organismes a considérablement baissé depuis la mise en place des substrats puis s'est stabilisé entre 2015 et 2016. Cette phase est normale et correspond à une densification végétale.

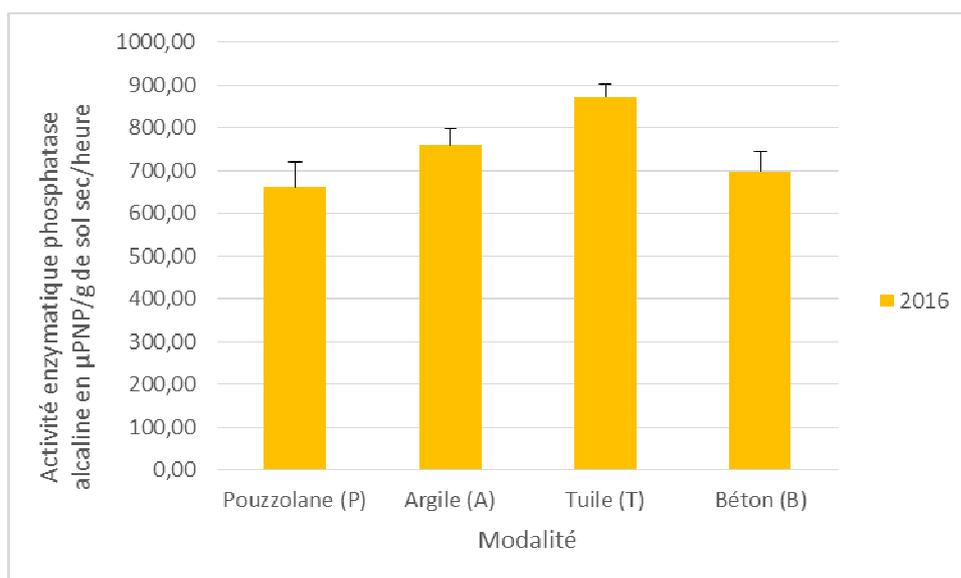
Cette activité pourrait être modifiée si au cours du temps des communautés floristiques très différentes se développent sur chaque substrat. Cet élément sera analysé dans le cadre du croisement des données sol/flore



La vitesse de minéralisation représentée par le quotient de respiration suit la même progression.



Enfin, la mesure de l'activité enzymatique des communautés microbiennes, en particulier l'activité enzymatique des bactéries et des champignons, à partir de la phosphatase alcaline, affiche des valeurs plutôt élevées et comparables à celles que l'on mesure dans des prairies riches en humus. Les substrats tuile et argile semblent être ceux qui possèdent la plus forte activité ce qui est cohérent avec les autres résultats.



## V. Faune du sol

Des comptages de la faune épigée présente dans les substrats ont été réalisés pour la première fois en 2016 afin d'évaluer si la nature du substrat pouvait influencer les populations de collemboles, d'acariens, de myriapodes, etc... Les résultats obtenus montrent de fortes disparités entre les substrats (exprimés en individus par m<sup>2</sup>).

	Collembolés	Acariens	Autres arthropodes	Total
Pouzzolane	17	40	1	58
Argile	8	138	6	152
Tuile	8	22	3	33
Béton	13	19	1	33

Ainsi, le substrat argile est celui qui présente la population totale la plus élevée toute microfaune confondue en raison d'importante population d'acariens du genre *Oribate* et *Actinedida*. On retrouve néanmoins les mêmes acariens pour toutes les modalités.



*Oribate* (x83)



*Actinedida* (x83)

Pour les collembolés, les plus fréquents sont du genre *Isotomide*, avec cependant quelques *Entomobryens* présents dans le substrat argile.



*Isotomides* (x83)



*Entomobryens* (x40)

La modalité « argile » comporte les plus d'individus des trois groupes identifiés autant en termes de nombre que de diversité spécifique. Pour les autres substrats, n'étaient présents qu'une ou deux de ces familles en nombre suffisant.



*Cloporte sp* (x25)



*Cryptos sp.* (x30)



Larve de diptère (x40)

Le substrat à base de billes d'argile est celui qui possède à la fois la plus forte biodiversité ainsi que la population la plus importante de micro-arthropodes. Ces résultats sont intéressants car il n'existe pas ou peu de données sur les populations de micro-arthropodes dans les substrats de toitures végétalisées. Les prélèvements de 2017 seront essentiels pour suivre l'évolution de ces organismes dans les substrats.

Il a été aussi observé dans les échantillons la présence de fourmis. Leur présence est un indicateur très positif car les fourmis participent à la formation des sols en particuliers dans les substrats très simplifiés comme ceux présents sur la toiture.

# CONCLUSION

---

Les analyses de 2016 confirment les tendances mesurées en 2014 et 2015. Les substrats sont en train de s'équilibrer et de se stabiliser sur le plan organique et chimique. L'évolution des paramètres biologiques est positive et devrait se maintenir avec la densification progressive de la végétation sur les substrats. Tous les paramètres mesurés, sont compatibles avec le développement de végétaux. Ces derniers, en restituant chaque année de la litière au sol devraient accroître la fertilité des substrats.

D'un point de vue agronomique et biologique, après 3 années d'expérimentation, le substrat à base de billes d'argiles est celui qui est le plus qualitatif suivi par le substrat à base de tuile, puis par celui à base de béton. Le substrat à base de pouzzolane arrive dernier de ce classement en raison de la trop grande stabilité des éléments grossiers. Les mécanismes de pédogénèses y sont pour le moment plus lents que sur les autres substrats.

## **Glossaire:**

*Biodisponible* : se dit d'un élément chimique du sol pouvant être prélevé facilement par les racines des plantes.

*C/N* : le rapport de la quantité de carbone sur celle d'azote permet de juger du degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire sa capacité à être dégradée plus ou moins rapidement.

*CEC* : la capacité d'échange cationique correspond à la capacité du sol à retenir des éléments. Plus elle est haute et plus le sol est fertile.

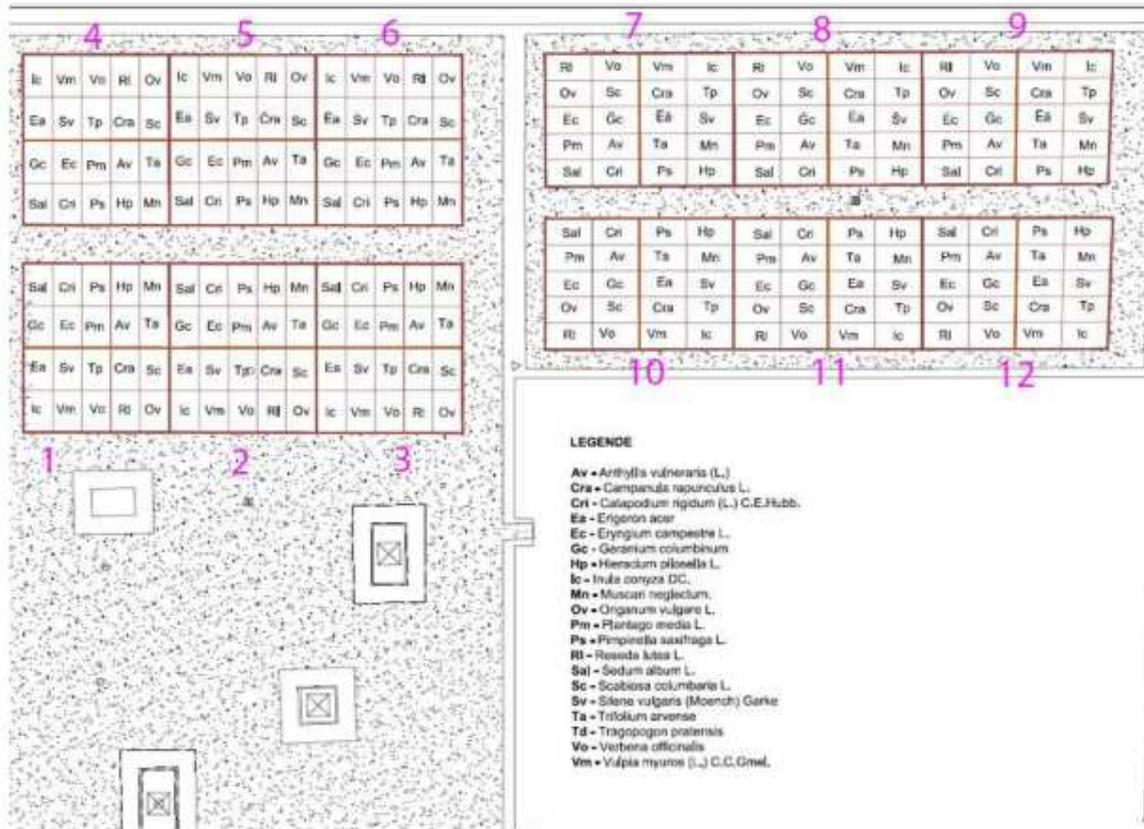
*Collemboles* : petits arthropodes détritivores

*Diptères* : groupe taxonomique comprenant les mouches, taons, moustiques et syrphes.

*Humus* : forme stable issue de la décomposition de la matière organique.



## Annexe 1 : Plan d'inventaire des placettes



## Annexe 2 : Exemple de suivi photographique de la végétation (année 2014)

Mai

Juin

Août

Placette 1



Placette 2



**Placette 3**



**Placette 4**



**Placette 5**



**Placette 6**



**Placette 7**



**Placette 8**



**Placette 9**



**Placette  
10**



Placette  
11



Placette  
12

